

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованого промислового робота для операцій
фрезерування

Виконав: студент

VI курсу, групи КТМ-61

спеціальності

174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Вельгов А.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Золотий Р.З.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованого промислового робота для операцій
фрезерування

Виконав: студент

VI курсу, групи КТМ-61

спеціальності

174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Диня М.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Золотий Р.З.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«___» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Вельгову Андрію Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованого промислового робота для операцій фрезерування

Керівник роботи Золотий Роман Захарійович, к.т.н., доцент кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «___» _____ 2023 року № _____

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 грудня 2023р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про операції фрезерування

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Технологічна частина

Конструкторська частина

Науково-дослідна

Спеціальна частина

Безпека в надзвичайних ситуаціях, охорона праці, Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент кафедри КТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В. М., проректор з адміністративно-господарської роботи та будівництва		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.11.2023	Виконано
2.	Підбір наукових джерел по темі роботи	26.11.2023-28.11.2023	Виконано
3.	Опрацювання наукових публікацій та збір даних по темі роботи	29.11.2023-1.12.2023	Виконано
4.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	2.12.2023-4.12.2023	Виконано
5.	Оформлення першого та другого розділів	5.12.2023-7.12.2023	Виконано
6.	Оформлення третього розділу	8.12.2023-10.12.2023	Виконано
7.	Оформлення четвертого розділу	11.12.2023-13.12.2023	Виконано
8.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	14.12.2023-15.12.2023	Виконано
9.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.12.2023-17.12.2023	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.12.2023-19.12.2023	Виконано
11.	Нормоконтроль	19.12.2023-20.12.2023	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	21.12.2023	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	22.12.2023	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

_____ (підпис)

Вельгов А.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотий Р.З.

_____ (прізвище та ініціали)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент кафедри КТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В. М., проректор з адміністративно-господарської роботи та будівництва		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.11.2023	Виконано
2.	Підбір наукових джерел по темі роботи	26.11.2023-28.11.2023	Виконано
3.	Опрацювання наукових публікацій та збір даних по темі роботи	29.11.2023-1.12.2023	Виконано
4.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	2.12.2023-4.12.2023	Виконано
5.	Оформлення першого та другого розділів	5.12.2023-7.12.2023	Виконано
6.	Оформлення третього розділу	8.12.2023-10.12.2023	Виконано
7.	Оформлення четвертого розділу	11.12.2023-13.12.2023	Виконано
8.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	14.12.2023-15.12.2023	Виконано
9.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.12.2023-17.12.2023	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.12.2023-19.12.2023	Виконано
11.	Нормоконтроль	19.12.2023-20.12.2023	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	21.12.2023	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	22.12.2023	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

_____ (підпис)

Диня М.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотий Р.З.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає 73 друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано 57 літературних джерел.

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування промисловим роботом-маніпулятором для забезпечення фрезерувальної обробки.

Було проаналізовано основні розробки в цій галузі, розглянуто основні моделі при реалізації маніпулятивних систем обробки, вказано сфери їх застосування.

В результаті було промодельовано роботу системи керування таким маніпулятором, що дозволило покращити режими обробки при фрезеруванні.

Впровадження таких систем дозволить розширити сферу застосування промислових роботів.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, РОБОТ, ФРЕЗЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ССТ (англ. Conservative Congruence Transformation) – консервативне перетворення конгруентності

MRR (англ. material removal rate) – швидкість знімання матеріалу

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1. Останні розробки в галузі оброблювальних роботизованих систем	9
1.2 Роботизована обробка для швидкого створення прототипів.....	12
1.3. Аналіз вібрації або стукоту.	16
1.4. Планування траєкторії обробки роботом.	19
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	27
2.1. Основи механічної обробки роботами-руками	27
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	34
3.1 Удосконалення системи роботизованої обробки.....	34
3.2. Управління процесом механічної обробки.....	35
3.3. Планування та програмування траєкторій при механічній обробці.....	38
4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	42
4.1 Оптимізація постави роботизованих оброблювальних центрів	42
4.2. Аналіз вібрації/стукоту.....	44
5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	50
5.1 Результати експериментальної обробки	50
6 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ, ОХОРОНА ПРАЦІ.....	55
6.1. Система управління охороною праці	55
6.2. Вимоги до робочого середовища користувача ЕОМ: мікроклімат, освітлення, рівень шуму, електромагнітне випромінювання.....	58

6.3. Створення і функціонування системи моніторингу довкілля з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території	60
6.4. Організація цивільного захисту на об'єктах промисловості та виконання заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного походження	63
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67

ВСТУП

Про перші дослідження обробки роботів повідомлялося в 1990-х роках. Незважаючи на те, що з тих пір у всьому світі проводяться безперервні дослідження обробки роботів, потенціал застосування роботів в обробці ще не реалізований. Дослідження такого характеру можна грубо розділити на дослідження щодо розробки систем обробки роботів, планування траєкторії обробки роботів, аналізу вібрації/тріскотіння, включаючи відстеження та компенсацію траєкторії, динамічного моделювання або моделювання жорсткості. Ці дослідження, очевидно, підвищать точність і ефективність обробки роботів і нададуть корисні посилання для розробки систем обробки роботів для завдань, які колись вважалися доступними лише для верстатів з ЧПК.

Щоб просунути технологію обробки роботів на наступний рівень, щоб можна було розробити більш практичні та конкурентоспроможні системи, можна припустити, що майбутні дослідження роботизації повинні також зосередитися на аналізі ефективності обробки роботів, плануванні шляху на основі карти жорсткості.

Сучасна промисловість значною мірою залежить від роботів, які мають широкий спектр застосувань, таких як перенесення матеріалів, точне складання, зварювання та механічна обробка [1–4]. Незважаючи на те, що більшість роботів використовують для операцій, які традиційно виконуються роботами, також очікується виконання деяких операцій, пов'язаних з механічною обробкою. Це, безумовно, збільшить застосування роботів у механічній обробці.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Останні розробки в галузі оброблювальних роботизованих систем

Відповідно до білої книги, опублікованої The Robotic Industries Association у 2009 році [3], продукти та послуги роботизованої обробки складають менше 5% існуючих продажів роботів, але вони розглядаються як сегмент додатків, що розвиватиметься протягом наступних 3–5 років.

Застосування включають попередню механічну обробку деталей, виготовлених із твердіших матеріалів, за допомогою роботів, які виконують різні процеси з меншими допусками. Вважалося, що роботизована обробка не може замінити обробку з комп'ютерним числовим керуванням (ЧПК) для трьох-чотирьох осей, але зараз вона розглядається як безпосередній життєздатний альтернативний інструмент для неметалевих матеріалів і металів залежно від ступеня твердості, необхідної поверхні обробка та складність деталей.

Біла книга також виявила, що перешкодою для більш широкого впровадження обробки роботів є загальний брак знань у спільноті кінцевих користувачів щодо можливостей і переваг роботів у додатках обробки. Тому необхідно докласти значних зусиль, щоб навчити кінцевих користувачів можливостям роботизованої обробки, перш ніж буде реалізовано значне збільшення застосувань роботизованої обробки. Усвідомлюючи потенціал роботизованої обробки, провідні світові виробники промислових роботів починають надавати роботів-обробників разом із відповідними програмними пакетами [5–8]. Навіть розробники традиційного програмного забезпечення для систем автоматизованого проектування (CAD)/автоматизованого виробництва (CAM), такі як Delcam [9], включили можливості автономної

обробки роботів на основі CAD у свої традиційні програмні пакети CAD/CAM.

Перед застосуванням для прямої механічної обробки руки робота використовувалися для виконання робіт, пов'язаних з механічною обробкою. Деякі дослідження показали, що роботи можуть добре працювати під час полірування [10–12], шліфування [13–16] та видалення задирок [17, 18].

Основною метою полірування є створення глянсової або гладкої поверхні, а не зміна розмірів деталі. Інструменти для полірування часто м'які або гнучкі, тому вимоги до точності позиціонування не дуже високі. Це створило чудову можливість для роботів досягти успіху в полірувальних операціях, тому що шарнірна рука робота може легко розмістити полірувальний інструмент у будь-якому необхідному положенні. Було стверджено, що роботизоване шліфування та полірування може забезпечити кращу якість поверхні, ніж у трьохосьових фрезерних верстатів з ЧПК [18, 19].

Краща шорсткість поверхні від шліфування/полірування роботом (0,52 мкм проти 1,30 мкм при тривісному фрезеруванні) головним чином пов'язана зі здатністю робота легко змінювати орієнтацію інструмента, отже, він може завжди тримати інструмент перпендикулярно до полірованої поверхні.

Що стосується операцій фрезерування, багато досліджень повідомляють про змішані результати, які показують, що потрібно внести багато вдосконалень, перш ніж роботизоване фрезерування можна буде легко застосувати до операцій фрезерування. Цікаво відзначити, що шарнірні роботи мають деякі проблеми, такі як низька повторюваність, але вперше роботи були успішно застосовані для фінішних операцій механічної обробки (полірування та шліфування), де вимоги до якості поверхні деталей високі. Частково це можна пояснити швидкістю вивезення матеріалу.

На етапах чорнового різання (або фрезерування) і чистового різання необхідно видалити велику кількість матеріалу. Це призведе до великого

навантаження на руку робота, але жорсткість поточної конструкції робота недостатньо висока, щоб витримати таке велике навантаження під час обробки.

Таким чином може виникнути велика помилка в обробці. Щоб подолати недоліки шарнірних роботів у механічній обробці, у 2009 році Європейська Комісія профінансувала проект під назвою COMET (підключай і виробляй компоненти та методи для адаптивного керування промисловими роботами, які забезпечують економічно ефективно високоточне виробництво в фабрика майбутнього) [19].

Цей проект був спрямований на подолання проблем, з якими стикається європейська обробна промисловість, шляхом розробки інноваційних систем обробки, які є гнучкими, надійними та передбачуваними з середньою економічною економією порівняно з верстатами. Основою проекту були обрані промислові роботи. Дослідники проекту усвідомлюють притаманну слабкість промислових роботів, тобто низьку точність позиціонування, вібрацію через силу процесу та відсутність надійного інструменту програмування. Багато хто очікує, що цей проект значно розвине технологію обробки роботів.

Для шарнірних роботів повторюваність за своєю суттю залежить від відстані досяжності. Чим більше відстань досяжності, тим меншою буде повторюваність. Цю притаманну характеристику можна легко пояснити: коли робот повністю розтягнутий, він є консольною балкою. Податливість кантилевера значною мірою залежить від довжини кантилевера. Насправді ця характеристика була виявлена в даних, наданих постачальниками комерційних роботів (наприклад, ABB, Motoman, Fanuc, Kuka).

У таблиці 1.1 наведено деякі дані для трьох обраних моделей роботів ABB [7].

Таблиця 1.1 - Досяжна відстань і повторюваність робота

Robot model	Reach distance (mm)	Repeatability (mm)
ABB IRB 120	580	± 0.01
ABB IRB 140	810	± 0.03
ABB IRB 1410	1,440	± 0.05

Можна побачити, що зі збільшенням відстані досяжності також збільшується помилка повторюваності. Ця таблиця також показує, що повторюваність сучасного промислового шарнірного робота може досягати $\pm 0,01$ мм, чого достатньо для багатьох робіт із низької та середньої точності обробки деталей.

Насправді, більшість робіт з обробки не потребують великої відстані. Якщо відстань досяжності конструкції робота буде зменшена, можна буде ще більше покращити повторюваність. Нижче наведено класифікацію останніх досліджень роботизованої обробки на три напрямки, а саме швидке створення прототипів, аналіз вібрації/струскоту, планування шляху та автоматичне програмування роботів.

1.2 Роботизована обробка для швидкого створення прототипів.

Шарнірні промислові роботи гнучкі, економічно ефективні та зазвичай мають велику робочу зону. Однак вони мають низьку позиційну точність і жорсткість, що обмежує ранні дослідження роботизованої обробки, спрямовані на створення великих прототипів, які важко виготовити як на верстатах з ЧПК, так і на машинах для швидкого прототипування на основі шарів.

Швидке створення прототипів на основі механічної обробки.

Ранні дослідження механічної обробки роботів були спрямовані на виготовлення деталей зі складною геометрією та обмеженою точністю

(скажімо, 1,00 мм). Vergeest і Tangelder вперше повідомили про роботизовану систему обробки, яка складалася з шарнірного промислового робота, поворотної горизонтальної платформи для фіксації заготовки та фрезерного пристрою, встановленого на кінцевому ефекторі робота [20].

Система була здатна виготовляти деталі в межах 80-сантиметрового куба. Була згадана можливість програмування роботів в режимі офлайн, але подробиць не повідомлялося. Майже в той же час Чен і Це також повідомили про роботизовану систему для швидкого створення прототипів [20].

Крім основних компонентів, про які повідомляється в системі Вергеста і Тангелдера, рука робота в системі Чена і Це була встановлена на лінійній доріжці довжиною 3 м, що могло значно розширити можливості роботизованої системи. Також було повідомлено про детальний метод планування шляху обробки роботом.

Подальше вдосконалення роботизованої системи обробки було задокументовано в їхніх наступних публікаціях [21–23].

На рис. 1.1а показано налаштування апаратної системи. Симуляція шляху обробки роботом і перевірка показані на рис. 1.1б. Щоб ще більше підвищити ефективність роботизованої обробки, Хуанг і Лін повідомили про подвійну систему роботизованої обробки [24].

У їхній системі заготовка встановлюється на фіксованому робочому столі, а дві роботизовані руки використовуються для спільної обробки 3D-деталі. Подібну систему роботизованої обробки з двома руками можна побачити в дослідженні, проведеному Оуеном та ін. [25, 26]. Вони використовували дві роботизовані руки, одна з яких служила опорою, а друга — інструментом для обробки. Ця система має більше ступенів свободи, що дозволяє виготовляти деталі зі складнішою геометрією. Однак система є більш сумісною, тому потребує більш ретельного моніторингу сили обробки.

Сили, що діють на кінцеві ефектори, контролювалися, щоб визначити початок збурення, щоб систему можна було сповільнити до того, як

фактично відбулося насичення. У відповідь на збурення метод масштабування часу може зменшити швидкість інструменту, тим самим зменшуючи потребу в крутих моментах з'єднань і дозволяючи точніше слідувати попередньо розрахованому шляху. Переваги обробки робіт були додатково розширені Лі та Цай та ін. [27], які тестували планування роботи та співпрацю в Інтернеті.

Ця система хороша для спільного використання ресурсів, автономного ремонту та заміни пошкоджених частин у небезпечному середовищі чи просторі. Щоб обробити деталь із кращою якістю поверхні, Zielinski et al. розробив роботизовану систему, яка була здатна як фрезерувати, так і полірувати [28].

Вважалося, що великі деталі, оброблені роботом, можуть мати хорошу обробку поверхні. Навіть незважаючи на те, що шарнірні руки роботів мають дуже хороший доступ порівняно з традиційними верстатами з ЧПК, деякі складні геометричні елементи, такі як порожнини або внутрішні отвори, не можуть бути зроблені шарнірними роботами. На рис. 1.2а показаний розріз моделі зливу унітазу. Внутрішні канали моделі не можна було обробити на будь-яких існуючих верстатах з ЧПК.

Чен та ін. [29, 30] розробили метод на основі шарів із використанням роботизованої обробки, який міг створювати деталі зі складними внутрішніми характеристиками, такими як ті, що показані на рис. 1.2б і с.

Шари не мають рівномірної товщини. Натомість товщина шару адаптується до зміни кривизни та аналізу доступності вздовж орієнтації конструкції.

Калібрування робота.

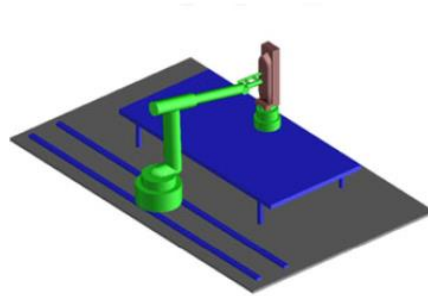
Щоб розробити систему обробки робота з кращою точністю, повідомлялося про різні методи калібрування. ПЗЗ-камери часто використовувалися для визначення кінематичних параметрів фактичної

установки обробки, щоб можна було покращити точність позиціонування робота [23, 24].

На рис. 1.3 показано метод калібрування робота на основі зору, коли вимірювальний циліндр розміщується в заздалегідь визначених місцях на поворотному столі [23]. Похибки позиції Δx , Δy і Δz вимірювали за допомогою двох камер, встановлених в ортогональних положеннях. Морріс та ін. повідомили про метод калібрування робота з використанням координатно-вимірювальної машини (СММ). Експериментальні вимірювання деяких поз роботів проводяться за допомогою СММ. На основі вимірювань розроблено кінематичну модель.



а



б

Рисунок 1.1 - Роботизована система обробки: а - налаштування системи; б - симуляція та перевірка траєкторії обробки.



а



б



в

Рисунок 1.2 - Великі деталі з внутрішніми деталями, виготовлені за допомогою пошарової роботизованої обробки: а - САD-модель; б - модель зливу унітазу; в - модель замку для руки робота.

Також встановлено його зв'язок зі світовою системою координат і інструментом [31]. Андрес та ін. опублікував новий метод для калібрування складної роботизованої робочої клітини з вісьмома з'єднаннями, призначеними для фрезерування [32]. Розроблено метод планарного калібрування для оцінки зовнішніх параметрів конфігурації з'єднання за допомогою лазерного датчика переміщення, таким чином уникаючи прямого контакту з калібрувальним зразком. Схема вирішення резервування на рівні сумісної швидкості інтегрована з системою САМ для повного контролю роботизованої робочої клітини під час відстеження шляху виконання завдання фрезерування.

Загалом, метод калібрування має служити двом цілям. По-перше, він повинен встановити зв'язок між системою координат робота та системою координат заготовки. По-друге, слід виконати деякі вимірювання, щоб кінематичні параметри робота можна було змінити, щоб точно описати фактичне положення та орієнтацію ланок робота.

1.3. Аналіз вібрації або стукоту.

Шарнірні руки робота дуже маневрені та гнучкі з хорошим доступом. При використанні для обробки завжди є компроміс між низькою динамічною точністю та хорошою доступністю. Ось чому ранні дослідження обробки роботів були спрямовані на створення прототипів великих розмірів і складної геометрії [20–23, 33]. Точність виготовлення деталей не була головною проблемою. При використанні в обробці твердих або металевих матеріалів низька жорсткість систем обробки роботів становить більшу проблему. Що ще гірше, жорсткість руки робота значно відрізняється в різних напрямках. Наприклад, статична жорсткість.

Повідомляється, що бот-система обробки становила 83,65 мкм/Н у напрямку X, 20,35 мкм/Н у напрямку Y та 68,76 мкм/Н у напрямку Z [34, 35]. Через різницю в жорсткості в різних напрямках точність різання також виявилася різною в різних напрямках різання.

Щоб підвищити точність різання робота, слід експериментально встановити кореляцію між вібрацією/тріскотінням і параметрами обробки. Наприклад, Zaghbani зібрав сигнали вібрації та сили різання з аналізом, щоб знайти надійну область обробки динамічної стабільності щодо швидкості шпинделя [36]. Швидкість подачі також є важливим параметром обробки. Це також має великий вплив на точність обробки [35].

Тому бажано планувати оптимальну швидкість подачі з компромісом між ефективністю обробки та якістю обробки. Було виявлено, що постійна швидкість подачі завжди є кращою, якщо це можливо протягом усього процесу обробки [37].

Враховуючи той факт, що низька жорсткість руки робота може спричинити помилки обробки, дослідники розробили деякі методи для компенсації помилок. Чжан і Пан повідомили про метод контролю похибки обробки на основі компенсації прогину та адаптивної швидкості видалення матеріалу (MRR) [38–40].

Компенсація прогину була заснована на матриці жорсткості в декартовому просторі, яку дослідники розробили на основі експериментів. MRR адаптувався до сил різання, які вимірювалися в режимі реального часу в процесі обробки. На підставі як компенсації прогину, так і контрольованого MRR було повідомлено, що точність обробки ливарних деталей можна підвищити з 0,9 до 0,3 мм. Для автоматичного автономного програмування роботів Abele та ін. розробив автономну модель компенсації помилок для шляху обробки [41].

Модель можна використовувати для прогнозування сили різання, щоб очікуване відхилення різання можна було компенсувати на основі матриці

податливості робота під час фактичного різання. Оскільки шлях ріжучого інструменту можна контролювати, точність промислового робота для механічної обробки може бути підвищена [42]. Оскільки шарнірний робот має неоднорідну жорсткість у своїй робочій зоні, для робота буде найкраще виконувати роботу з обробки в межах можливого діапазону найкращої жорсткості.

Воснякос і Матсас представили метод, згідно з яким фрезерування робота може виконуватися в тих областях робочого простору робота, де кінематичні та динамічні можливості маніпулювання є найвищими, таким чином вичерпуючи потенціал робота, щоб впоратися з процесом.

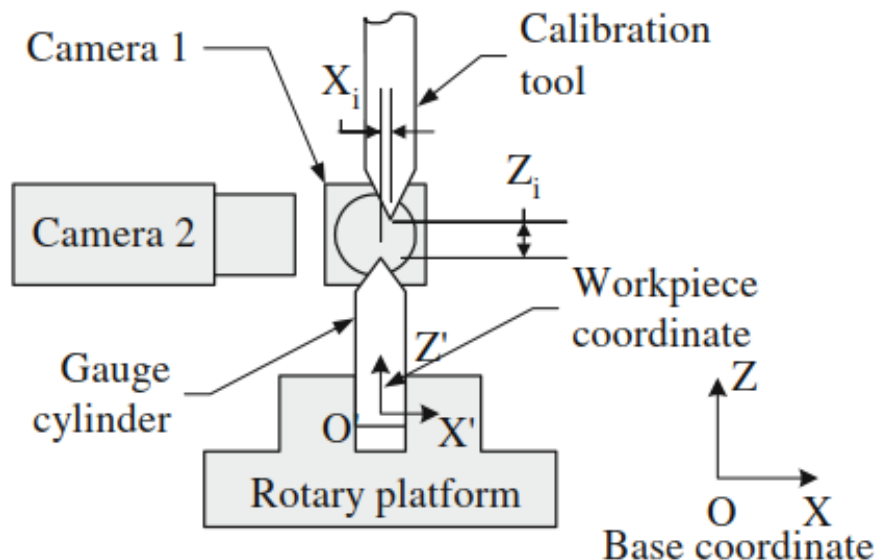


Рисунок 1.3 – Калібрування руки робота

Вибравши найбільш підходящу початкову позицію робота щодо деталі, можна досягти зменшення діапазону необхідних обертальних моментів у з'єднанні. Генетичний алгоритм використовувався для мінімізації навантажень крутного моменту на з'єднанні з урахуванням сил фрезерування. [43].

Подібно до роботи Воснякоса та Матсаса, Лопес та Пірес запропонували підхід до оптимізації розташування заготовки на основі траєкторії обробки та сил обробки. Знову ж таки, для оптимізації

початкового розташування заготовки було використано генетичний алгоритм [44]. Усвідомлюючи, що на точність обробки роботів впливає багато факторів, Andrisano et al. запропонував інтегрований підхід для підвищення точності обробки роботів на основі роботизованого моделювання процесу, індивідуального проектування механічних пристроїв для системи обробки та програмних модулів для керування та програмування роботів [45].

Вони також підкреслили важливість перевірки стратегії обробки, автоматичної генерації шляху робота, калібрування робочої клітини та введення коду робота в експлуатацію. Для того, щоб точно визначити динамічну поведінку робота-обробника, були описані як експериментальний метод, так і аналітичний метод. Бісу та ін. використовували частотний метод для вимірювання динамічного відгуку під час фрезерування у визначених точках [46].

Оскільки можна виміряти лише дуже небагато точок, цей метод не є безпосередньо корисним для планування траєкторії робота під час обробки. Про більш корисний метод ідентифікації жорсткості суглобів роботів повідомляють Dumas et al. [47]. Вони оцінюють значення жорсткості з'єднання з урахуванням як поступального, так і обертового зміщення кінцевого ефектора робота для даного прикладеного ключа (сила плюс крутний момент). На основі значень жорсткості з'єднань вони також розробили декартову матрицю жорсткості робота, яка є більш корисною для планування шляху обробки робота.

1.4. Планування траєкторії обробки роботом.

Існує багато літературних повідомлень про автоматичне планування траєкторії обробки з ЧПК на основі моделей CAD [48]. За останні 30 років, за оцінками авторів, у міжнародних журналах і на конференціях було опубліковано щонайменше десятки тисяч статей про планування траєкторії

обробки з ЧПУ. Навіть зараз статті в цій галузі постійно з'являються [49]. Порівняно з багатством планування траєкторії для обробки з ЧПК, дуже мало публікацій про планування траєкторії автоматичної обробки роботом може бути знайдено. Може існувати помилкове уявлення, що планування шляху обробки роботом є таким самим або подібним до планування шляху ЧПУ.

Це хибне уявлення могло завадити розвитку роботів. Це правда, що є певна подібність між плануванням шляху ЧПУ та плануванням шляху обробки робота. І все ж різниця суттєва. Наприклад, вплив жорсткості на планування траєкторії обробки робота є значним, але жорсткість верстата з ЧПК має набагато менший вплив на планування траєкторії ЧПУ.

Крім академічних досліджень щодо автоматичного планування траєкторії для обробки роботів, деякі комерційні компанії також активно займаються розробкою пакетів програмного забезпечення, здатних автоматично генерувати траєкторію робота з моделі CAD або траєкторії інструменту. Robotmaster[®] повідомив про програмне рішення для програмування на основі CAD/CAM для фрезерування та обрізання роботів [50].

Robotmaster може створювати точні шестиосьові траєкторії роботи на основі даних траєкторії інструменту. Під час генерації траєкторії робота перевіряються помилки сингулярності, зіткнення, недосяжності та розтягування суглобів. Функціональність Robot-master більш-менш відображає досягнення ранніх досліджень автоматичного планування траєкторії обробки робота [21–23, 51].

Однак динамічні особливості робота не враховуються в Robotmaster. Останні дослідження роботизованої обробки більше зосереджені на впливі роботизованої динаміки на точність і ефективність обробки [46,47,52,53]. Олабі та ін. запропонували оптимізувати швидкість подачі наконечника інструмента в декартовому просторі для заданої траєкторії інструменту,

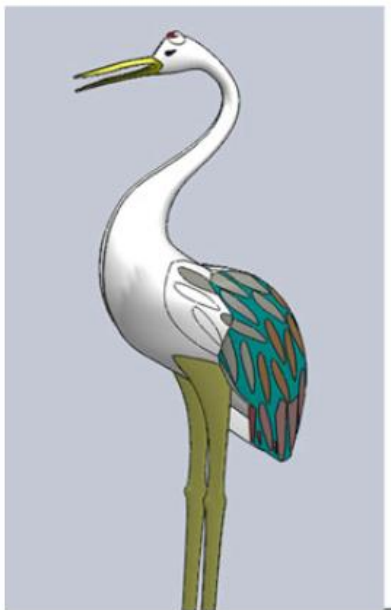
використовуючи шаблон обмеженого плавного ривка з урахуванням кінематичних обмежень з'єднань [52].

Тобто динамічні характеристики робота враховуються при визначенні одного з ключових параметрів обробки «швидкість подачі». Сяо та ін. запропонувати метод планування траєкторії робота на основі даних про розташування фрези (CL), згенерованих звичайним CAD/CAM [53].

При виконанні зворотної кінематики аналізується надлишковий механізм, щоб уникнути сингулярних конфігурацій і меж суглобів. Стратегія усунення зазорів застосована для зменшення ривкового руху, спричиненого відведенням інструменту та з'єднанням траєкторій різання. Крім згаданих вище статей щодо планування шляху/траєкторії в обробці роботів, нічого іншого не вдалося знайти.

Майже всі відомі методи планування траєкторії різання роботів базуються на даних CL, згенерованих або за допомогою існуючого методу, або за допомогою існуючого програмного пакета CAD/CAM. Виходячи з досвіду авторів, під час генерації даних CL слід враховувати динаміку робота.

Загальним принципом генерації даних CL має бути мінімізація руху суглобів, коли робот переміщується від одного місця різання до наступного.



а

б

Рисунок 1.4 - Механічна обробка птиці журавля: а - модель птаха-журавля; б - машина майже до форми.

Прогрес у дослідженнях обробки роботів останніми роками є відносно повільним. Це могло бути наслідком різних факторів. Для того, щоб розвивати науку та технології обробки роботів, визначено наступні проблеми, які необхідно вивчити в майбутньому.

1. Ефективність роботизованої обробки ніколи не досліджувалася: Насправді, це одна з головних проблем роботизованої обробки, яку необхідно вирішити, щоб розширити роботизовану обробку на більшу кількість застосувань. Зазвичай роботизована обробка має набагато більші переваги при обробці великих компонентів порівняно з обробкою з ЧПУ.

Однак при механічній обробці великого компонента, як правило, потрібно видалити більше матеріалу. Однак через обмежену жорсткість і корисне навантаження робота швидкість подачі, глибина різання та діаметр фрези мають бути невеликими.

Це обмежить швидкість зняття матеріалу або ефективність обробки. Бажано розробити деякі стратегії обробки, такі як спеціальні схеми різання, щоб можна було підвищити ефективність обробки. На малюнку 4а показана тривимірна модель птаха-журавля. Якщо його буде виготовлено за допомогою роботизованої обробки на основі сировини прямокутного блоку, потрібно видалити багато матеріалу. Якщо зайвий матеріал видаляти потроху традиційним зигзагом, це займе багато часу.

На рис. 1.4б показано грубу обробку деталі до наближеної форми в площині проєкції X–Y. Після цього можна зробити деталь близькою до форми в площині Y–Z і площині X–Z. Після цього чорного різання надлишок матеріалу значно зменшується. Це значно підвищить ефективність роботи. Також можна використовувати подвійні роботи для обробки: один робот для

чорної обробки, а інший – для чистової обробки. Роботизована обробка може дозволити собі розкіш кількох роботів завдяки своїй низькій вартості.

Таке розмежування завдань обробки може значно підвищити точність обробки, а також ефективність роботи, оскільки одні руки робота найкраще розроблені для більшого корисного навантаження, а інші — для більшої точності.

2. Розробіть карту жорсткості в межах робочої оболонки робота.

Для заданої точки в робочій зоні її можна досягти за допомогою багатьох можливих конфігурацій з'єднань робота, багато з яких мають досить різну жорсткість, що вплине на якість обробки. Якщо карта жорсткості відома та легкодоступна, можна визначити оптимальні конфігурації з'єднань для даного шляху обробки. Це допоможе підвищити якість обробки.

У попередніх дослідженнях механічної обробки роботів майже всі зареєстровані системи використовували існуючу промислову шарнірну руку робота. Два популярних шпиндельних насадки показані на рис. 1.5а і 1.5б. Обидва методи кріплення послабляють і без того слабку жорсткість руки робота та ускладняють розрахунок системи.

Тут пропонується сконструювати шпиндель інструмента в кінцевій ланці (або зап'ясті) робота, як показано на рис. 1.5в, щоб можна було уникнути ексцентричної сили та спростити обчислення.

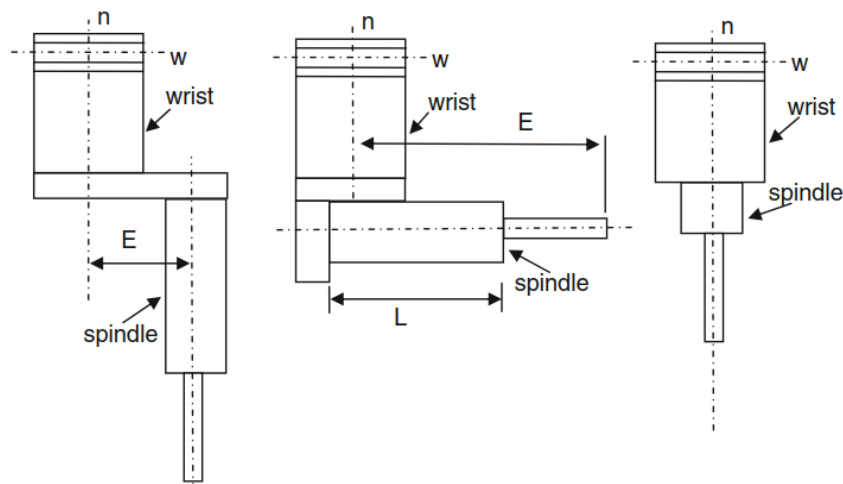


Рисунок 1.5 - Кріплення шпинделя до кінцевої ланки робота (зап'ястя)

3. Оптимізована конфігурація роботизованої системи обробки.

Роботизована обробка наразі досліджується на основі існуючих промислових роботів, які найкраще підходять для перенесення матеріалів і зварювання. Щоб отримати найкращі результати обробки, дослідження обробки роботів не повинні обмежуватися поточними конфігураціями промислових роботів. Слід провести дослідження пропорції та конструкції ланок L1, L2 та L3, як показано на рис. 1.6, для оптимальної доступності та жорсткості обробки. Ми всі знаємо, що серійні роботи мають проблеми з точністю в основному через ефект збільшення помилок конструкції руки та низьку жорсткість руки.

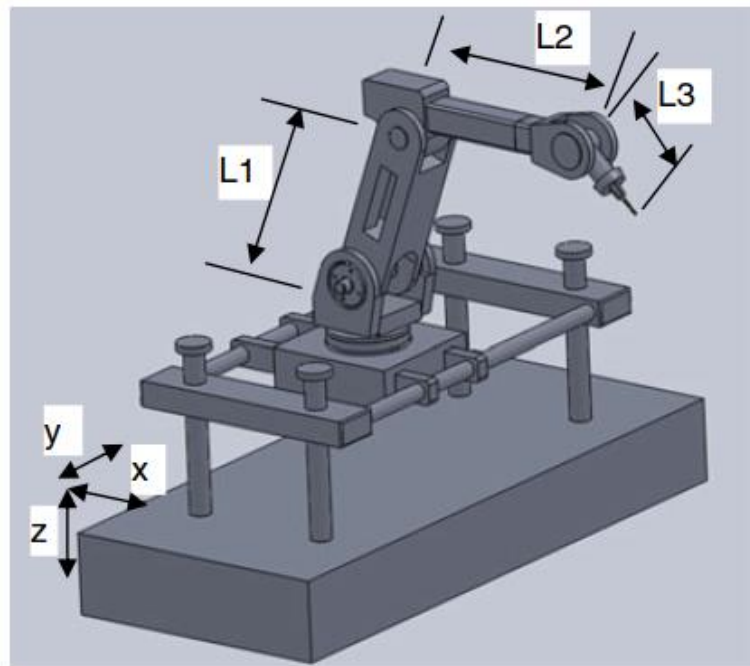


Рисунок 1.6 - Запропонована робоча клітина для обробки

Одним із підходів є зменшення масштабу манипулятора робота, оскільки це може зменшити ефект збільшення помилки та збільшити жорсткість манипулятора робота. Зменшений діапазон охоплення можна компенсувати введенням лінійного етапу для позиціонування деталі або

монтажу руки робота на прецизійний стіл XYZ, як показано на рис. 1.6. Немає необхідності контролювати XYZ етап під час обробки.

Натомість положення руки робота на столі XYZ можна попередньо обчислити, щоб можна було виконати оптимальні операції обробки з точки зору доступності та жорсткості для певної деталі. Оскільки конструкція та виготовлення столиків XYZ є зрілою технологією, яка може забезпечити столики з хорошою жорсткістю та субмікронною точністю. Додавання ступеня XYZ не матиме видимого погіршення точності та жорсткості системи робота.

4. Роботизовані лінії обробки. Переваги робототехніки найкраще проілюстровані, коли лінія роботів використовується для автоматичного виконання робіт, як це часто можна побачити на автоматичних складальних лініях заводу. Існують дослідження ізольованих застосувань роботів для механічної обробки, видалення задирок, шліфування або полірування.

Проте жодних зусиль щодо розробки автоматичної лінії обробки, яка має всі вищезазначені функції, не повідомлялося. На рис. 1.7 показана запропонована така робота-обробна лінія. Автори не погоджуються з концепцією одночасної обробки декількома роботами, оскільки це може створити багато додаткових проблем, таких як вібрація та кручення. Натомість спеціалізований робот для спеціальної операції виготовлятиме деталі найкращої якості.

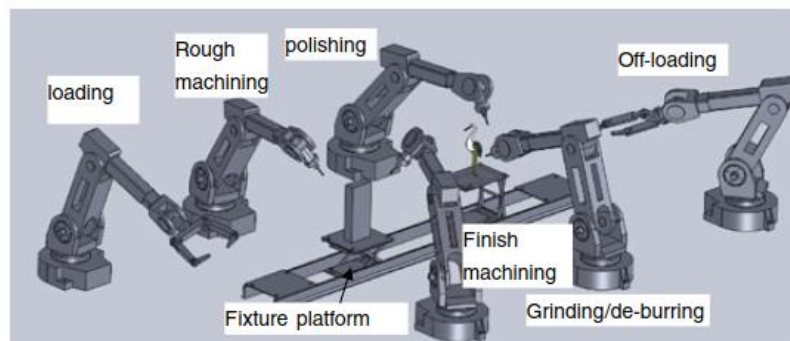


Рисунок 1.7 - Запропонована роботизована механічна лінія

Наприклад, лінія роботизованої обробки, показана на рис. 1.7, має спеціального робота для чорнової обробки та робота для кінцевої обробки. Робот для чорнової обробки може бути розроблений для високої жорсткості, але фінішний робот може бути розроблений для більшої точності, оскільки швидкість видалення матеріалу під час чистової обробки зазвичай дуже мала, тому вимоги до навантажувальної здатності є низькими.

За потреби можуть бути додані інші операції кінцевої обробки, такі як шліфування або полірування. За потреби також можна додати фарбувального робота, щоб виріб можна було повністю виготовити в одну лінію. Звичайно, для того, щоб автоматична робота-обробна лінія стала реальністю, потрібно провести багато дослідницької роботи.

У цьому розділі подано огляд останніх досліджень і розробок, пов'язаних з робото-механічної обробкою. Виявлено, що попереду ще довгий шлях, перш ніж роботизовані обробні системи набудуть широкого застосування в практичних цілях. У поточних дослідженнях більшість дослідників вирішили використовувати існуючих промислових роботів, які не розроблені та не оптимізовані для операцій обробки. Внутрішні проблеми низької динамічної точності, вібрації та тріскотіння ніколи не можуть бути вирішені на основі поточних досліджень. Останніми роками це заважало розвитку роботів. У цій статті автори запропонували шляхи покращення точності та ефективності обробки роботів, щоб системи обробки роботів могли широко використовуватися в майбутньому. Окреслено чотири майбутні проблеми обробки роботів. Сподіваємося, що дослідження цих питань можуть згодом просунути технологію обробки роботів.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Основи механічної обробки роботами-руками

У наш час нерідко можна знайти новини та дослідження про роботизовану обробку, наприклад фрезерування та свердління. Гнучкість, програмованість і низька ціна роботів, на відміну від верстатів з ЧПК, робить роботизовану обробку цікавою можливістю для виготовлення великих деталей.

У розділі буде показано поточні досягнення в розробках роботизованої обробки та теоретичну основу процесу, демонструючи його слабкі та сильні сторони. Оскільки низька жорсткість роботів є їхнім головним недоліком, мета дослідників — покращити цю характеристику, а отже, уникнути негативних ефектів, таких як вібрація, яка впливає на точність обробки.

Останні розробки можна класифікувати відповідно до сфери їх дослідження: моделювання та керування процесом, оптимізація робочого простору робота, аналіз надлишковості, аналіз вібрації/тріскання та нові конструкції та методології для вдосконалення обробки. Ці дослідження підвищують ефективність і точність процесу з метою перетворення роботів на реальну альтернативу верстатам з ЧПК.

Мета - запропонувати характеристику кількох операцій обробки за допомогою роботів, враховуючи керування силою/крутним моментом, що забезпечує систему зворотного зв'язку з покращеною матрицею жорсткості для виправлення помилок і підвищення точності під час обробки. Механічна обробка за допомогою роботизованих рук — це поєднання двох областей або областей техніки: процесів обробки та робототехніки. Як відомо, у першій галузі використовуються верстати з числовим програмним керуванням для виконання операцій обробки з високою надійністю та точністю для виготовлення деталей для різних типів промисловості. З іншого боку,

досліджується, що промислові роботи зазвичай використовуються в додатках з низькими контактними зусиллями, такими як обробка матеріалів, зварювання, складання, фарбування тощо.

Використання роботизованих рук у промисловості постійно зростає із середнім зростанням 12% на рік, за оцінками, що в 2020 році в цілому буде працювати 3 000 000 роботів [1]. Окрім типових застосувань, за останні два десятиліття зріс інтерес до використання роботизованих рук для обробки завдань, хоча їх використання в цій галузі все ще становить менше 5% від загального обсягу продажів [2]. Впровадження рук роботів для завдань обробки включає багато промислових секторів, від автоматизації та аерокосмічного сектору до медичної промисловості. Роботи застосовувалися для таких завдань обробки, як фрезерування, свердління, чорнова обробка та різання. Крім того, вони були застосовані для вирішення завдань обробки поверхні в таких застосуваннях, як шліфування, чистка, полірування та видалення задирок [2], [3], [4]. Залежно від сфери застосування, роботи, як правило, замінюють ручні завдання, категорію, до якої ми можемо віднести роботи-руки для спільної роботи.

Той факт, що життєві цикли продукції стають коротшими, а попит на високі стандарти якості зростає, промисловість шукає альтернативу ручним процесам або негнучким автоматизованим рішенням [5], особливо в роботах, які є шумними, забруднювальними та нездоровими для операторів, оскільки середовище роботи автомобільна промисловість [6].

Роботи також з'являються як альтернатива для завдань верстатів з ЧПК, де потрібен великий обсяг роботи та розробка складних геометрій. В аерокосмічній та енергетичній промисловості великі багатоосьові верстати з ЧПК використовуються для фрезерування великих деталей, що вимагає великого розміру заводу, а також несе великі експлуатаційні витрати [7].

Промислові роботи здатні обробляти складні тривимірні фігури, крім того, вони мають великий обсяг роботи, який можна збільшити за допомогою

додаткових осей. На додаток до цих переваг, роботи мають хорошу програмованість, адаптивність і гнучкість з меншою інвестиційною вартістю на відміну від верстатів з ЧПК з таким самим навантаженням [4], [6].

Деякі дослідження вказують на 30% зниження загальної вартості при використанні роботів [8]. Недоліком використання роботизованих рук є в основному те, що вони мають меншу жорсткість порівняно з верстатами з ЧПК. Жорсткість для шарнірного робота становить 1 Н/мкм, що нижче жорсткості стандартного верстата з ЧПК 50 Н/мкм [6].

Цей основний фактор у поєднанні з силами, що виникають у процесі різання, створює відхилення в кінцевому ефекторі, що спричиняє помилки положення, вібрації, погану якість і низьку точність виготовленої частини [3]. У деяких випадках відхилення кінцевого ефектора, спричинені силами різання, досягали 10 мм.

У таблиці 2.1 наведено детальне порівняння верстатів з ЧПК і роботизованих рук для завдань обробки.

Таблиця 2.1 - Порівняння верстатів з ЧПК і роботів для обробки. Адаптовано [4].

Indicator	CNC machine	Industrial Robot
Accuracy	-0.005 mm	-0.1 – 1.0 mm
Repeatability	-0.002 mm	-0.03 – 0.3 mm
Workspace	Limited	Large
Workspace extending	Impossible	Possible by adding extra actuated axis.
Kinematic architecture	Cartesian	Serial
Number of actuated axes	3 or 5	6+
Kinematic redundancy	Non	Yes, 1 degree of freedom at least
Complexity of trajectory	Suitable for de 3/5 axes machine	Any complex trajectory
Relation between actuated and operational space	Linear	Non-linear
Actuator feedback	Single encoder	Single or double encoders
Mechanical compliance	Relatively low	Relatively high
Compliance error compensation	Non-required	Mechanical (Gravity compensators) Algorithmic (off-line and/or on-line)
Dynamic properties	Moderate, homogeneous with the workspace.	High, heterogeneous with the workspace.
Programming language	Standardized G-code language	Manufacture specified languages (KRL, V+, Karel, RAPID, Inform, etc.)
Manufacturing flexibility	Single or several similar operations	Any type or operation
Price	Competitive for 3 axis tools. Expensive for 5 axis tools	Competitive for 6 axis robots.

Високий коефіцієнт зменшення в з'єднаннях робота спричиняє втрату тертя та люфт. Невелика зміна коефіцієнта зменшення з'єднання може спричинити значну похибку в точності центральної точки інструменту (ТСР). Різниця з помилками через «низьку жорсткість» полягає в тому, що ці останні ефекти менш передбачувані [3].

Основна проблема: роботизована модель обробки. Щоб зрозуміти недоліки та проаналізувати поведінку роботів під час процесу обробки, необхідно використовувати адекватну та точну математичну модель для прогнозування переміщення конструкція робота під прикладеним навантаженням. Роботизовані системи розроблені для досягнення високої точності позиціонування. Пружні властивості його ланок вважаються незначними, тому домінуючим фактором, який сприяє прогину маніпулятора, є податливість суглоба. Це продукт гнучкості, створеної: геометрією та властивостями матеріалу з'єднання, приводами та іншими елементами трансмісії та положенням робота [9], [10].

Спільна відповідність є найбільшою проблемою для відхилення ТСР. Ця змінна є оберненою до жорсткості. Отже, для аналізу конструкції робота необхідно визначити величину жорсткості кожного суглоба [11].

Фактор жорсткості в механічній обробці настільки важливий, що в цій галузі було розроблено багато тем для досліджень робототехніки. Загалом для роботів обговорювалося багато аспектів, таких як моделювання жорсткості послідовних і паралельних роботів, визначення параметрів жорсткості та аналіз характеристик жорсткості [10].

Пашкевич А. та ін. [12] у своїх дослідженнях виконали аналіз існуючих моделей жорсткості, які можна побачити в таблиці 2.2. Як можна проаналізувати, якщо буде більше припущень, буде збільшення складності з'єднання модель. Відповідно до проаналізованої літератури, моделі, які зазвичай використовуються, відповідають декартовим матрицям жорсткості, запропонованим Солсбері та Ченом і Као [13].

Таблиця 2.2 - Підсумок пов'язаних робіт для декартової матриці жорсткості.

Publications	Model & assumptions	Stiffness matrix
Salisbury (1980)	Serial manipulator, elasticity in actuators.	$K_c = J_{\theta}^{-T} \cdot K_{\theta} \cdot J_{\theta}^{-1}$
Zhang et al. (2004)	Serial kinematic chain without passive joint, elasticity in virtual joints.	$K_c = \left(\sum_i J_{\theta i} \cdot K_{\theta i}^{-1} \cdot J_{\theta i}^T \right)^{-1}$
Pashkevich et al. (2009)	Serial kinematic chain with passive joint, elasticity in virtual joints.	$\begin{bmatrix} K_c & * \\ * & * \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{\theta} \cdot K_{\theta}^{-1} \cdot J_{\theta}^T & J_q \\ J_q^T & 0 \end{bmatrix}^{-1}$
Chen & Kao (2000)	Serial or parallel manipulator with external loading (non-over constrained).	$K_c = J_{\theta}^{-T} \cdot (K_{\theta} - K_F) \cdot J_{\theta}^{-1}$
K_c – Cartesian stiffness at the end effector (6×6) K_{θ} – Joint stiffness of the virtual springs ($n_{\theta} \times n_{\theta}$) J_{θ} – Jacobian of the virtual springs ($6 \times n_{\theta}$)		J_q – Jacobian of the passive joints ($6 \times n_{\theta}$) K_F – Stiffness matrix induced by external loading ($n_{\theta} \times n_{\theta}$) θ_i – Position of robot joint i.

Для визначення декартової матриці жорсткості моделі використовували принцип віртуальної роботи, що дозволяє робити певні припущення щодо статичного випадку. Відповідно до цього принципу робота має бути однаковою в будь-якому наборі координат, тобто робота в декартових координатах має бути такою ж, як і робота в спільних координатах. Таким чином, шляхом математичної розробки рівності віртуальної роботи, вираз для декартової матриці жорсткості дається як,

$$K_x = J(Q)^{-T} \cdot K_q \cdot J(Q)^{-1} \quad (2.1)$$

де K_q відповідає матриці жорсткості суглоба, а $J(Q)$ матриці Якобі робота. Як видно, цей вираз відповідає моделі Солсбері, але це формулювання дійсне лише тоді, коли робот знаходиться у квазістатичній конфігурації, без зовнішніх навантажень або коли матриця Якобі є постійною в робочому просторі робота (наприклад, декартовий робот) [7].

Завдяки консервативному перетворенню конгруентності (ССТ), Чен та ін. [13] додав додатковий термін, відомий як K_g о K_f , який розглядає зміни в геометрії за наявності зовнішніх зарядів F . Таким чином, ми маємо,

$$K_x = J(Q)^{-T} \cdot (K_q - K_g) \cdot J(Q)^{-1} \quad (2.2)$$

де K_g визначається виразом

$$K_g = \underbrace{\left[\frac{\partial J(Q)^{-T}}{\partial \theta_1} F \quad \frac{\partial J(Q)^{-T}}{\partial \theta_2} F \cdots \frac{\partial J(Q)^{-T}}{\partial \theta_{n-1}} F \quad \frac{\partial J(Q)^{-T}}{\partial \theta_n} F \right]}_{n \times n}, \quad (2.3)$$

Це розширене визначення жорсткості враховує навантаження зовнішніх сил на кінцевий ефектор. Він не використовується зазвичай, оскільки багато досліджень вважають його незначним значенням, коли робот знаходиться в робочій зоні з оптимізованою жорсткістю. Для шарнірної руки декартова матриця жорсткості не є діагональною матрицею і залежить від конфігурації робота.

Це вказує на те, що, по-перше, сила і деформація в декартовому просторі пов'язані. Сила, прикладена в одному напрямку, породжує деформацію у всіх можливих напрямках.

По-друге, жорсткість є функцією кінематики робота через якобіан $J(Q)$, який значно змінюється в робочому просторі робота та відповідно до положення, яке займає робот.

З припущенням, що жорсткість суглоба постійна і що зміни положення можна моделювати, можна розрахувати декартову жорсткість. Таким чином, деформація ТСР під дією зовнішньої сили може бути оцінена як

$$\Delta X = J(Q)^{-T} \cdot (K_q - K_g) \cdot J(Q)^{-1} \cdot F \quad (2.4)$$

Деякі автори використовують матрицю відповідності для визначення попереднього рівняння, уникаючи розрахункових помилок при визначенні оберненого якобіана. Загалом основна складність реалізації даної моделі полягає в тому, що визначення жорсткості суглобів вважається постійним і має бути досягнуто експериментально.

Тому існує кілька методологій, які можна спостерігати в роботах Zhang H. et al. [6], Abele E. та ін. [11], Dumas C. та ін. [14] у Olofsson B. et al. [15].

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Удосконалення системи роботизованої обробки

Роботизована обробка була обмежена м'якими матеріалами, такими як пластик та/або алюміній, і використовували консервативні швидкості подачі, щоб уникнути надмірних зусиль різання в процесі. Для вирішення цих проблем були проведені різні дослідження з метою їх подолання. Chen Y. та ін. [2] вивчили дослідження, проведені до 2013 року, і класифікували їх за категоріями відповідно до напрямків роботи, такими як розробка роботизованих систем обробки, планування траєкторії обробки, аналіз вібрації/струкотіння та динаміка.

Майже одночасно було розроблено два проекти за фінансування Європейського Союзу для покращення обробки промисловими роботами, перший проект називається «COMET» («Plug-and-produce Components and Methods for adaptive control of industrial robots enableing cost-effect, high precision manufacturing in future factories») хотів підкріпити знання та методології для впровадження роботизованої обробки.

Вони розробили такі аспекти, як кінематичне та динамічне моделювання роботів, програмне забезпечення для автоматичного програмування, відстеження траєкторії та високодинамічні механізми композиції. Її мета полягала в тому, щоб зменшити помилки, що виникають під час обробки, за допомогою адаптивного керування процесом. Другий проект під назвою «HERNESTOS»: «Малосерійний промисловий робот для обробки твердих матеріалів» мав головну мету розробки нових технологій роботизованої обробки твердих матеріалів, щоб забезпечити стандарт для планування обробки, програмування та контролю в реальному часі. Обидва проекти запровадили важливі досягнення в цій сфері.

Більш актуальні дослідження, як, наприклад, проведене Klimchik A. et al. [4], визначили останні досягнення в наступних аспектах:

- Покращення жорсткості маніпулятора шляхом збільшення перетину або використання сучасних матеріалів.
- Використовуйте гравітаційні механічні компенсатори для зменшення помилок відповідності.
- Використання других датчиків, розміщених на валу двигуна, для компенсації помилок.
- Застосування методів автономної компенсації помилок для зміни вхідного шляху в контролері.

Загалом, роботизована обробна клітина — це інтегрована виробнича система, яка складається з промислового робота з 5 або більше осями, шпинделя для ріжучих інструментів і сумісного програмного забезпечення для програмування кількох траєкторій.

Крім того, залежно від застосування, можуть бути додані допоміжні елементи, такі як сьома вісь ковзання, обертові столи, датчики сили/крутного моменту та системи бачення, які підвищують функціональність і гнучкість клітини. Далі наведено огляд останніх досягнень і досліджень роботизованої обробки, щоб отримати краще уявлення про використовувані моделі та архітектури.

3.2. Управління процесом механічної обробки.

Моделі керування для роботизованої обробки зазвичай можна розділити на два типи:

- створення компенсації в автономному режимі, де точна модель жорсткості та сил різання необхідна для оцінки прогинів, що виникли під час процесу.

- компенсація в режимі онлайн, де використання датчиків сили/крутного моменту є ключовим інструментом для програмування та керування в режимі реального часу [16], [17].

Зокрема, ми знайдемо регулятори сили, регулятори сили/положення та регулятори імпедансу. Ці типи управління використовуються з адаптивними, надійними, інтелектуальними або класичними методами чи техніками керування [18]. Pan Z. у Zhang H. [6], [9] у своїх дослідженнях зосередилися на покращенні якості та ефективності роботизованої обробки двома методами; компенсувати деформацію робота та максимізувати швидкість знімання матеріалу.

Щоб досягти цього, по-перше, вони використали звичайну модель жорсткості та датчик сили для виконання компенсації запрограмованої траєкторії в реальному часі. На рис. 3.1 можна оцінити принцип компенсації.

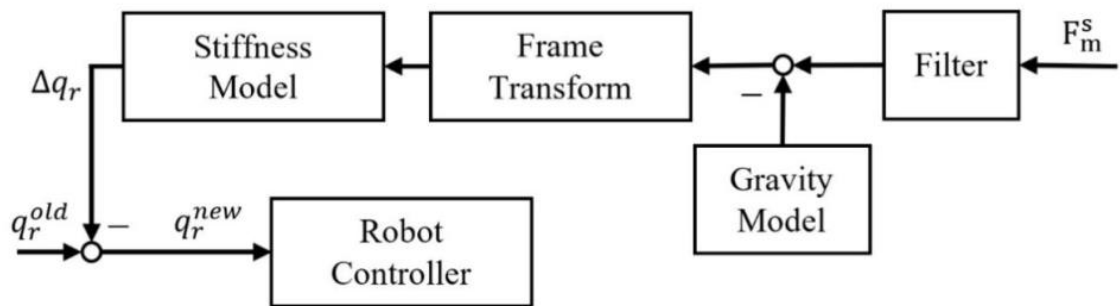


Рисунок 3.1 - Принцип компенсації деформації в реальному часі. (F_m^s : чутлива сила; q_r , положення суглоба) [6], [9].

По-друге, його метою було максимізувати швидкість знімання матеріалу (MRR), яка визначається наступним співвідношенням, де w це ширина різання (мм), d глибина різання (мм) і f подача різання в мм/хв).

Ширина та глибина різу залишаються постійними, тому для подачі різання зазвичай надається консервативне значення, щоб уникнути пошкодження шпинделя. Щоб максимізувати цей показник, вони використовували адаптивний тип керування. Але оскільки безпосередньо

вимірювати швидкість знімання матеріалу складно, вони регулювали це значення за допомогою вимірювання сили датчика на кінцевому ефекторі.

Адаптивне регулювання подачі різку для регулювання зусилля дозволило продовжити термін служби інструменту та підвищити продуктивність процесу. Експериментальні результати керування в режимі реального часу дозволили їм скоротити робочий цикл від 30% до 50% і покращити якість поверхні з поверхневою точністю від 0,9 мм до 0,3 мм.

У наступному дослідженні [19] автори застосували різні типи керування швидкістю знімання матеріалу, включаючи PI (пропорційне та інтегральне), адаптивне та нечітке керування. Адаптивне керування дало кращі результати з точки зору стабільності системи. У Тяпін І. та ін. [16] виявлено порівняння двох моделей для розрахунку автономної сили, перша враховує лише вплив глибини різання, а друга враховує вплив глибини та ширини різання як параметрів.

Їхні результати показали, що друга модель більш точна для виявлення відхилень від процесу. Інші більш сучасні методології були знайдені в роботі Sörmo O. et al [20] і Chen S. & Zhang T. [21], які розробили адаптивну модель управління силою. Також у роботі Cano P. et al [22], які розробили ітеративний контроль навчання, та в роботі Плухін Y. et al. [23], які розробили адаптивне керування, але вони використовували сигнали струмів в обмотках двигунів для надання інформації про навантаження, що діють на приводи.

Сен. L та ін. [7], запропонували модель, яка дозволяє краще зрозуміти динамічні ефекти, створені силами фрезерування. Їхня модель відрізняється від інших тим, що вони не використовують статичні моделі різання, які дійсні лише для функцій верстатів з ЧПК. Згідно з дослідженнями Сазерленда та ДеВора, миттєва сила фрезерування є функцією миттєвої товщини стружки, на яку, у свою чергу, впливає гнучкість системи обробки.

Тому необхідний ітераційний розрахунок балансу динаміки навантаження стружки без різання в кожен момент часу.

Ця теорія плюс використання вдосконаленої моделі жорсткості дозволили створити алгоритм для розрахунку миттєвої динамічної сили. Порівняння динамічної моделі з експериментами показало зменшення похибок розрахунку сил з 50% до 75%. Подібні дослідження можна знайти в роботі Klimchik A. et al. [24], але вони використовували модель жорсткості, запропоновану Pashkevich A. et al, [12].

У випадку контролю процесу буріння ми знайшли роботи Garnier S. et al. [25] і Gomes D. et al. [18] обидва підкреслювали, що контроль процесу має здійснюватися в три фази; фаза першого контакту або відступу, фаза видалення матеріалу та фаза остаточного контакту.

У першій роботі була реалізована теоретична модель, яка оцінювала силу кожної фази і таким чином компенсувала траєкторію. У другій роботі було реалізовано керування силою в режимі реального часу, що зменшило ковзання, створене під час першого контакту, але навіть у цьому випадку не вдалося уникнути відхилень в інших напрямках.

Показані результати дуже цікаві, оскільки демонструють надійність використання вдосконаленої моделі жорсткості, яка враховує динамічні параметри. Застосування цієї моделі могло б дозволити більш точний онлайн-контроль сили для компенсації в реальному часі.

3.3. Планування та програмування траєкторій при механічній обробці.

Щоб впоратися з відсутністю стандартизації в програмуванні роботів, виробники запропонували такі рішення в програмному забезпеченні, як Kuka CAMRob, Motoman Standard CNC G-Code Converter, FANUC Roboguide тощо, для передачі траєкторій у програму робота. Інші зовнішні компанії також

пропонують деякі спеціальні програми, такі як Robotmaster, PowerMill тощо [26]. Однак використання зовнішнього програмного забезпечення передбачає додаткові витрати.

У літературі ми можемо знайти певні методи програмування та планування траєкторії робота. Pan & Zhang [9] запропонували простий і швидкий метод програмування траєкторії обробки. Вони використовували лише гнучку підвіску робота та позначили кілька напрямних точок на траєкторії TCP.

Потім процес самонавчання робота пов'язав такі точки, і, нарешті, постпроцесор відфільтрував і зменшив дані для створення програми. Деякі зусилля також були спрямовані на створення підходу до стандартизації роботизованої обробки, як у Huynh H. et al. [27], які змоделювали процес обробки за допомогою спрощеної багатотілої моделі, або Zivanovic S. et al. [28], який запропонував підхід до застосування нових стандартів в операціях обробки шляхом використання промислових роботів.

Методологія, розроблена відповідно до стандарту ISO 10303-238, була запропонована для виконання процесу програмування, моделювання та роботизованої обробки.

Резервування.

Як було сказано вище, поведінка робота змінюється в робочому просторі, оскільки як його кінематика, так і динаміка залежать від положення. Кожна поза має свій власний стан стабільності, і вздовж траєкторії робота-рука може мати нескінченну кількість конфігурацій, тому дослідники використовують цю надлишковість для покращення обробки.

Робот є надлишковим, якщо ступені свободи (DOF) кінцевого ефектора менші за ступені свободи суглобової щілини. Це резервування збільшує доступний обсяг і здатність робота уникати перешкод. У літературі було визначено три типи резервування:

- Структурне резервування: розмір спільного простору m більший за розмір робочого простору n .
- Кінематична надлишковість: Розмір стику m більший за ступінь реалізації завдання t .
- Функціональне резервування: розмір робочого простору n великий ніж реалізована задача t .

Мусаві, С. та ін. [29], експериментально оцінили використання функціональної надлишковості для одного та двох ступенів свободи. Їх експерименти показали, що використання ступеня свободи дозволило їм отримати більш стабільні області, де продуктивність можна подвоїти. З іншого боку, додавання другого ступеня свободи у резервуванні може збільшити продуктивність на 40% або, навпаки, її можна зменшити.

На рис. 3.2 можна спостерігати стабільність для 1-DOF (кут повороту шести осей).

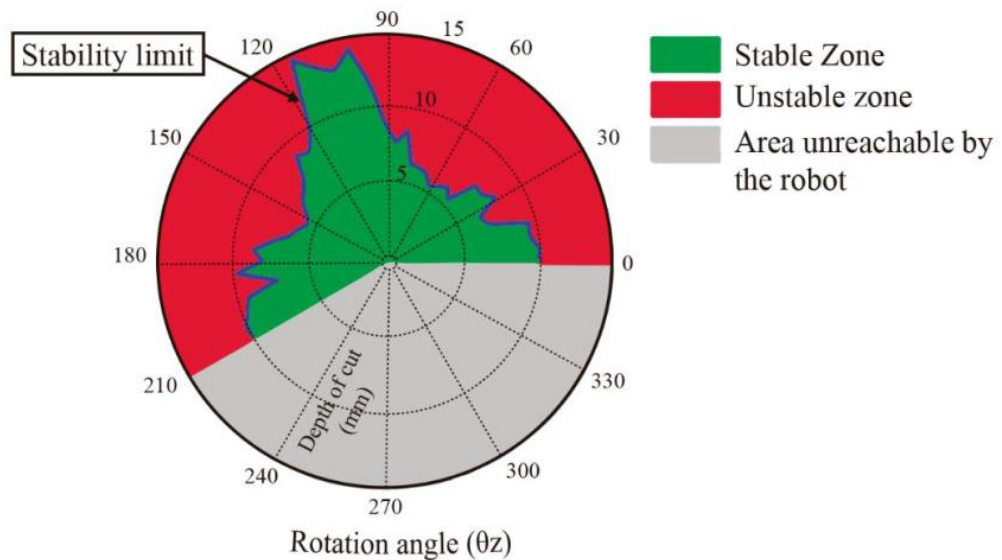


Рис. 2. Стійкість як функція надмірності 1-dof [29].

У наступних дослідженнях [30] використання ступеня надлишковості було оптимізовано за допомогою моделі для адаптивного керування положенням під час обробки. Експерименти продемонстрували переваги

використання функціонального керування надлишковістю для покращення стабільності, досягнення покращеної точності з 11 до 2,5 мкм для тих самих умов різання.

Важливість цих досліджень полягає в тому, що використання резервування дозволяє переходити від нестабільних до стабільних ділянок без зміни умов різання і таким чином гарантувати результат обробки. Недоліком є те, що вони не враховують динамічні ефекти механічної обробки.

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Оптимізація постави роботизованих оброблювальних центрів

Надмірність робітв дозволяє покращити спритність і, таким чином, підвищити їх продуктивність. У цьому сенсі багато дослідників створили та проаналізували індекси для оцінки ефективності пози робота під час операцій обробки. Деякі відомі індекси ефективності:

- «Числова умова» матриці Якобі — це верхня межа відносного посилення помилки округлення під час розв'язання системи лінійних рівнянь для вимірювання відстані до сингулярностей.

- «Маніпулятивність» — це абсолютне значення визначника матриці Якобі. Було заявлено, що хороший індекс маніпуляційності вказує на точку в робочому просторі, «далеку» від сингулярностей.

- «Коефіцієнт швидкості» вимірює здатність робота рухатися в заданому напрямку.

- «Коефіцієнт передачі сили» представляє здатність робота збалансувати задане навантаження.

- «Індекс сумарної сили» визначається як співвідношення між максимальною статичною силою в будь-якому суглобі та зовнішнім навантаженням.

Однак інші автори створили інші індекси для оптимізації положення робота, як у випадку Zargarbashi et al. [31], який визначив новий індекс, відомий як «Коефіцієнт передачі роботи» (RTR), який є абсолютним значенням косинуса кута між вектором крутного моменту та векторами швидкості з'єднання. Його мета полягає в спробі кількісно визначити ефективність сили приводу для створення заданої пози робота.

Максимізація цього показника дозволяє мінімізувати величини векторів моменту і положення, що дозволяє двигунам працювати відповідно

до своїх потужностей. Каро С. та ін. [8] розробили методологію визначення найкращого місця в робочому просторі для виконання операції обробки.

Вони визначають критерій якості обробки, який виражається через переміщення інструменту, метою оптимізації є мінімізація цього показника. Теоретичні результати показали, що оптимальний робочий простір пов'язаний з найкращою схемою резервування. Guo Y. та ін. [10] визначили інший показник, який базується на вимірюванні жорсткості робота в певних положеннях.

Вони досліджували «підматрицю трансляційної податливості», яка виражає залежність між поступальними переміщеннями кінцевого ефектора та прикладеною силою. Експерименти, проведені для максимізації індексу в завданнях свердління, продемонстрували рівномірну обробку та менші відхилення інструменту, що вказувало на більший опір робота зусиллям обробки.

Попередні роботи були зосереджені на отриманні методів вибору орієнтації для конкретної позиції обробки, але для отримання оптимальної позиції обробки необхідно оптимізувати глобальний робочий простір робота. Lin Y. та ін. [32] запропонували методологію оптимізації пози, яка базується на оцінці трьох показників у картах робочого простору робота: кінематики, жорсткості та деформації.

Завдяки цьому можна визначити найкращу продуктивність обробки. На рис. 4.1 можна оцінити оптимізовану поставу відповідно до попередньої методології, що дозволяє зменшити відхилення від 0,61 до 0,25 мм.

Незважаючи на хороші результати в індексах оптимізації, можна помітити, що жоден не враховує динамічні ефекти процесу, вони ґрунтуються лише на кінематичних і статичних критеріях, тому розгляд динамічних моделей, таких як представлена в Sen et al. [7] дозволило покращити результати оптимізації робочого простору робота.

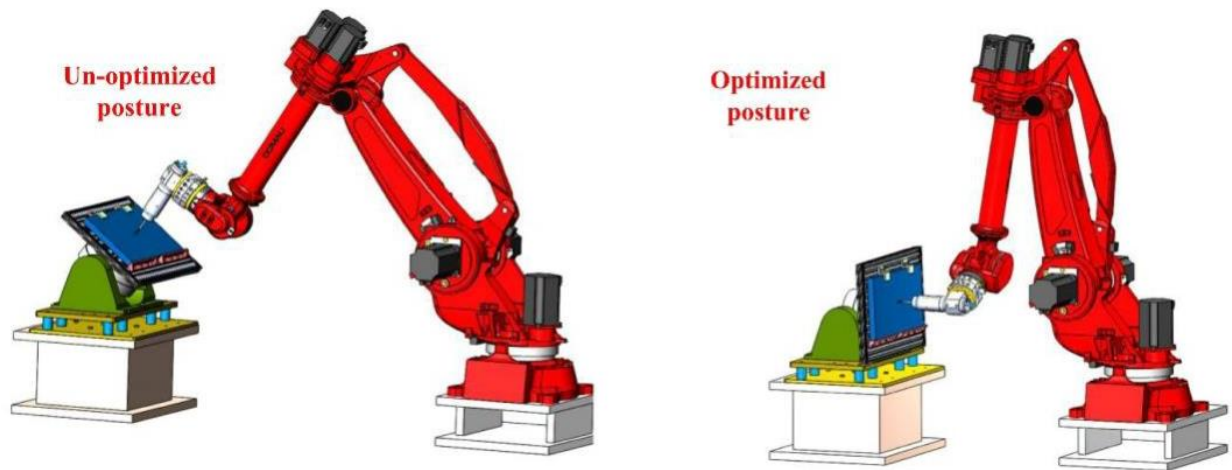


Рисунок 4.1 - Розміщення робочого простору відносно робота [32].

4.2. Аналіз вібрації/стукоту.

Однією з найбільших перешкод для захисту використання роботів у процесах обробки є вібрації, які виникають під час процесу.

Власна частота зазвичай приймає значення від 10 до 20 Гц, менше значення, ніж CNC машини, тому, враховуючи, що сили різання при обробці є періодичними і іноді мають непередбачувані варіації, поява явищ вібрації або стукоту не є дивною [3]. В якості основних джерел цих вібрацій було визначено два явища; регенеративне тріскотіння та тріскотіння зв'язку мод, перше пов'язане зі зміною сил і глибини різання, а друге – через вібрацію масової системи у всіх її ступенях свободи з різною амплітудою та фазою [5].

Ці несприятливі ефекти пошкоджують поверхню, що доповнюється низькою точністю розмірів, зменшується термін служби інструменту та може навіть спричинити пошкодження машини. Було розроблено кілька досліджень, щоб зменшити або усунути цю проблему. У роботі [5] автори у своїх дослідженнях виявили, що коли виникає стукіт, амплітуда сили різання різко зростає, і частоту стукоту можна спостерігати за допомогою швидкого перетворення Фур'є з даних датчика.

У той час як вони вивчали процес з різними напрямками просування та глибини різання, вони спостерігали наявність низькочастотної вібрації (10 Гц), коли глибина різання становила лише 2 мм, рухаючись у напрямку мінус Z.

Ця частота відповідає власній частоті основи робота, тому коли виникає вібрація, вона поширюється на всю конструкцію. Ця вібрація не змінюється зі зміною параметрів різання або розташування робочої поверхні, але вона змінюється залежно від розташування в робочому просторі робота та напрямку руху.

Відомо, що використання високих обертів шпинделя теоретично знижує вібрацію для будь-якої глибини різання. Але експерименти показали протилежне, тому автори визнали тріск зв'язку мод як найбільший фактор цієї вібрації. Автори [5] запропонували модель двох ступенів свободи, яка дозволила проаналізувати поведінку робота. Їх модель відповідала результатам експерименту, а основними факторами були конфігурація робота та глибина різання.

Як рекомендації вони запропонували використовувати спеціальні інструменти для контролю напрямку сил різання, на додаток до використання позицій і траєкторій робота, які мінімізують кут між результуючою силою різання та максимальним напрямком основної жорсткості робота. Недоліком цієї моделі є те, що її неможливо застосовувати до різних типів операцій різання безперервно, оскільки це впливає на діапазон руху та гнучкість робота.

Sen L. та ін. [33] представили модель для уникнення хвилювання зв'язку мод, але базували її на вдосконаленій моделі жорсткості. У цій моделі не потрібно змінювати напрямок подачі або орієнтацію деталі. Ця нова модель дозволила визначити параметри різання для отримання більшої жорсткості при зміні напрямку максимальної жорсткості, як показано на рис. 4.2.

Експериментальні результати моделі показали зменшення більш ніж на 45% результуючої сили та зменшення вібрації режиму зчеплення виникли при збільшенні швидкості випередження.

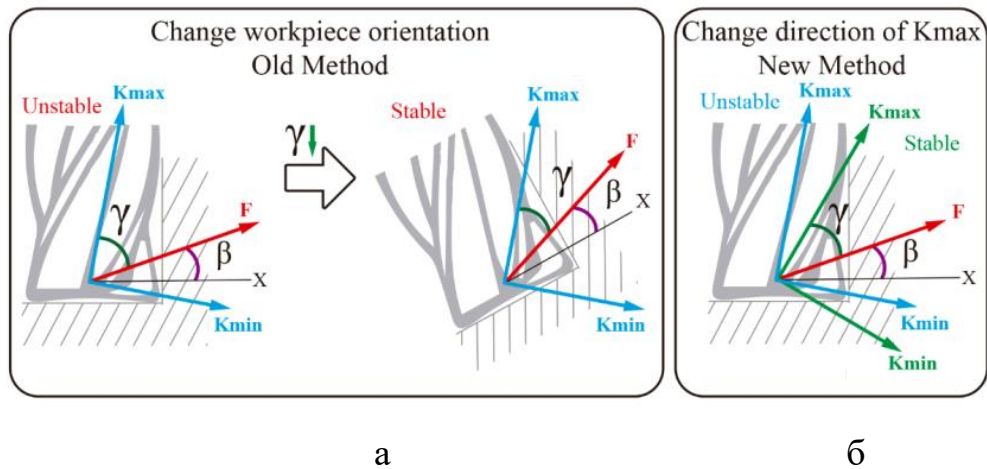


Рис. 4. Порівняння Методів уникнення: а - старий метод; б - новий метод. F – сила; K – жорсткість; β - кут між віссю X і силою; γ - кут між силою і максимальною жорсткістю [33].

Інші автори [34], запропонували методологію зменшення вібрації за допомогою використання вторинних кодерів. Ці кодери вимірюють вихідну позицію двигуна, що дозволяє генерувати зсув і, таким чином, досягається компенсація помилок. Амплітуда відхилення зменшилася з 0,75 мм до 0,25 мм. Хоча ця модель зменшує певні ефекти, вона має проблему не врахування динамічних ефектів у визначенні жорсткості.

Пристрої та методики.

У роботах [35] [36], розробили систему, відому як макро-міні-маніпулятор, яка складається з руки робота як макро-маніпулятора, що дозволяє виконувати основні рухи процесу, і міні-маніпулятора, який складається з пристрою, спеціально розробленого для виконання відповідних поліпшення. У випадку роботи, виконаної для Sörnmo O. et al., мікроманіпулятор, у якому встановлено шпиндель, мав механізм, керований п'єзоприводом, який дозволяв компенсувати відхилення у трьох напрямках,

за допомогою тензодатчиків і ємнісні датчики, які вимірювали положення шпинделя.

Експериментальні результати цієї системи досягли точності фрезерування ± 12 мкм. З іншого боку, у роботі, представленій у Mohammad A. et al., міні-маніпулятор контролював силу, прикладену до процесів полірування, за допомогою якої він зменшував інерційні ефекти, що викликали небажані вібрації. Möller C. та ін. [37] використовували вторинні кодери для покращення якості обробки в аерокосмічній промисловості. Використання вторинних кодерів і адаптивного керування дозволило покращити ефективну жорсткість і повторюваність операцій механічної обробки.

Вони перевірили цю модель експериментально через оцінку повторюваності за допомогою кругових рухів, збільшуючи точність вдвічі порівняно з випадком без кодувальників. Tian F. та ін. [38], представили конкретне рішення для вирішення проблем полірування на криволінійних поверхнях, їхня мета полягала в тому, щоб контролювати сили полірування через платформу з гнучким абразивним інструментом, який у поєднанні з керуванням робота забезпечує якість полірованого дзеркала. З іншого боку, Barnfather J.D. et al. [39] досліджували компенсацію розмірних помилок за допомогою даних із хмари точок за допомогою оптичних сканерів. Вони показали ефективний метод, який може виконувати перевірку хмари точок, які були вирівняні з координатами різання та використовувалися для компенсації траєкторії.

Їхні результати зменшили помилки розмірів на 96%. Нарешті, робота Denkena B. et al. [40] зосередився на новому дизайні робота, який мав достатню жорсткість, щоб витримати сили механічної обробки. Оцінивши кілька конструкцій, вони дійшли висновку, що поєднання манипулятора робота зі звичайним верстатом є найкращим поєднанням для вирішення

завдань обробки. Всі ці пропозиції хороші для конкретного випадку, але вони не вирішують загальної проблеми роботизованої обробки.

Аналізуючи досягнення, досягнуті в роботівній обробці, поки що не вдалося уніфікувати процедуру або методологію, які можна використовувати для більш ніж однієї операції обробки. Ми вважаємо, що моделювання сили різання та жорсткості робота можна покращити, взявши за основу пропозицію Sen L. et al. Проблема програмування рук роботів для процесів обробки продовжує залишатися незважаючи на певні спроби нормалізувати мову. Також не існує повної розробки спеціального обладнання для роботизованої обробки, оскільки могло б бути створення спеціальних шпинделів або датчиків з малою вагою. Вивчення досягнень у цій галузі є першим кроком для спрямування майбутньої роботи. Автори хочуть оцінити потужність і здійсненність мануальних роботів промислових і спільних роботів для їх використання в операціях обробки м'яких матеріалів, запропонувавши модифікації в їх контролі, щоб перетворити його на адаптивне керування та покращити його поведінку під час операцій обробки. В подальшому необхідно

- охарактеризувати процеси обробки за допомогою промислової та спільної роботизованої руки.
- вивчити динаміку та керування роботами та запропонувати відповідні модифікації для їх перетворення на адаптивне керування.
- технічно оцінити і економічно застосування сенсорних елементів і методів керування, які будуть інтегровані в процеси обробки за допомогою роботизованих рук.

Роботизована обробка має кілька специфічних проблем і численні неоднорідні внески різних авторів.

Розглянуті досягнення показують нам, що роботи мають повний потенціал для вдосконалення для виконання цих нових операцій. Нові конструкції роботів можна покращити не тільки завдяки кращому розумінню

процесу. ці досягнення можуть дати друге життя роботам, які працюють у кількох компаніях і виконують типові завдання. Якби промислові роботи могли забезпечувати точні позиції під час контактних ситуацій так само, як їхня добре відома повторюваність, роботизована обробка могла б стати дуже значним покращенням для багатьох застосувань. Здається, найкращий спосіб контролювати точність операцій обробки, що виконуються роботами, полягає в використанні методу, який враховує генерований крутний момент.

Система керування рукою робота повинна мати зворотний зв'язок динаміки, щоб запобігти пошкодженню їх з'єднань і двигунів і досягти необхідної точності.

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Результати експериментальної обробки

Результати експериментальної обробки без контролю зусилля можна побачити на рис. 5.1, у частині (а) показано результати фрезерування алюмінію роботом Mitsubishi. Неозброєним оком можна спостерігати, що є погана обробка, головним чином через невелике випередження та вплив сил різання на руку робота, що можна побачити візуально як опір руки слідувати за її рухом, що генерує неглибоку сітку. У випадку роботи робота Mitsubishi зі смолою, слот рис. 5.1(б), можна спостерігати хорошу обробку за тих самих умов різання. На рис. 5.1(б) у нижній частині можна побачити ефект фрезерування еластичним роботом UR3. Як можна спостерігати за однакових умов різання, 2 мм глибини проходу і ширини діаметра.

На механічну обробку повністю впливає низька жорсткість його з'єднань, що генерує ці хвилі, оскільки керування рухом продовжуватиме відновлювати вказане зміщення. Тут показано, як м'які матеріали, такі як смоли, вже впливають на ефективність процесу.

На рис. 5.1 с і d можна побачити решту експериментів, проведених з колаборативним роботом у смолі. Як видно, із збільшенням умов різання нестабільність процесу зростає до такого екстремуму, як у досліді E10, де інструмент повністю відхиляється. На рис. 5.2 показаний графік із аналізом розмірів відфрезерованих деталей. Вертикальне відхилення вказує на відхилення, створене в глибині різання щодо площини різання, з іншого боку, горизонтальне відхилення є відхиленням траєкторії, що міститься в цій площині різання, відносно запрограмованої.

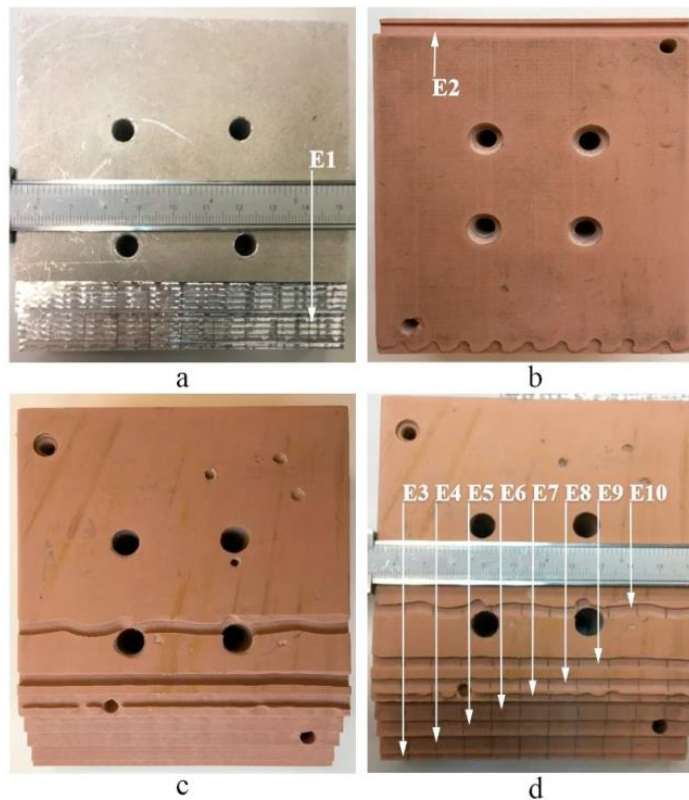


Рисунок 5.1. Результати експериментальної обробки: а - механічно оброблена алюмінієва деталь; б - оброблена смоляна поверхня частини а; с - оброблена смоляна поверхня б; д - оброблена смоляна частина з експериментами.

У випадку з роботом Mitsubishi, рис. 4а, спостерігається збільшення вертикального відхилення, оскільки положення в напрямку різальної подачі збільшується. Цей приріст постійний, а його варіації відносно лінії тренду невеликі, це пояснюється тим, що робот більш жорсткий, ніж колаборативний, але його максимальне відхилення пов'язане з тим, що 5-осьова конструкція робить не допускати коригування орієнтації центральної точки інструменту, за допомогою якої виходить робоча площина, відмінна від площини деталі.

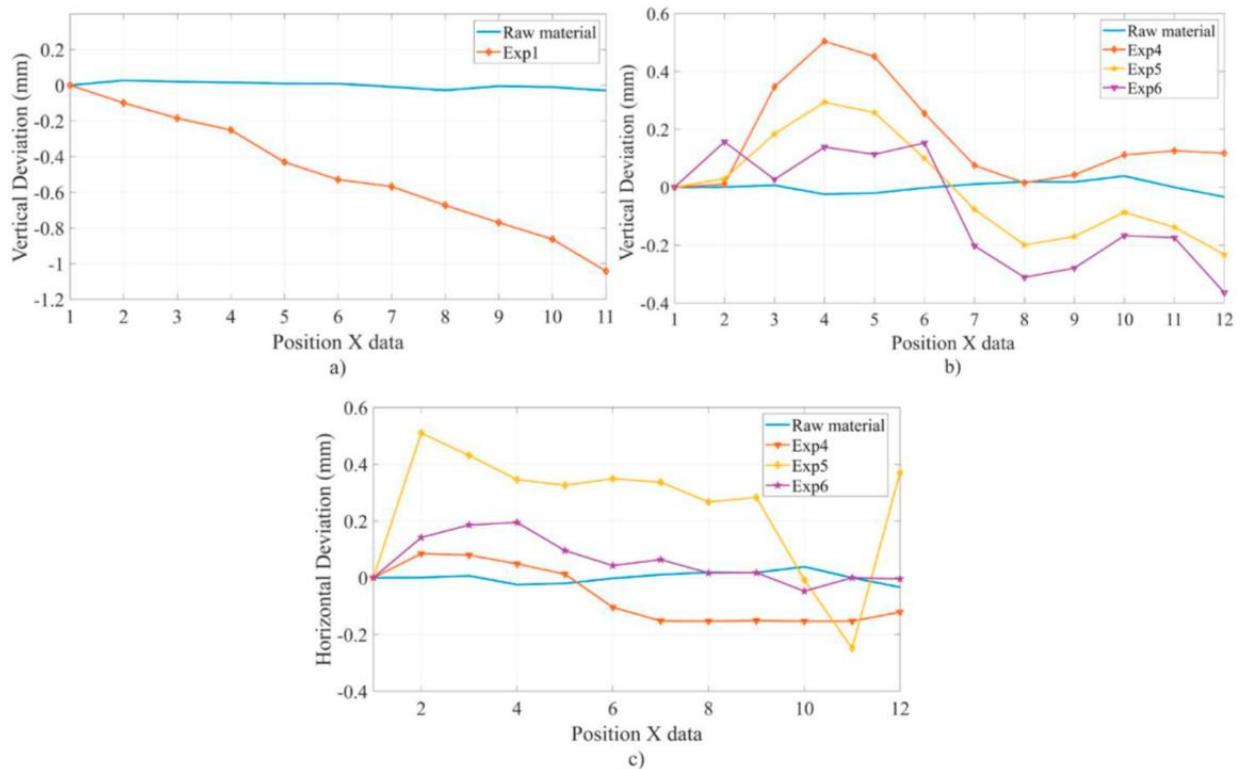


Рисунок 5.2 - Вертикальна девіація в алюмінії (а), вертикальне відхилення смоли (б) та горизонтальне відхилення смоли (с).

Незважаючи на меншу видимість механічної обробки алюмінію, результат фрезерування кращий, ніж необроблена заготовка. У випадку колаборативного робота збільшення шорсткості не таке виражене, як допуски на розміри.

Сила різання.

Для того, щоб мати можливість здійснювати контроль внутрішнього/зовнішнього контуру, необхідно знати профілі сил виконання операцій обробки. Як видно на малюнку 5, механічна обробка представляє значну нестабільність. В основному це пов'язано з низькою жорсткістю суглобів зап'ястя, які, якщо вони не включені в контур керування, створюватимуть збурення сили, вимірюної датчиком.

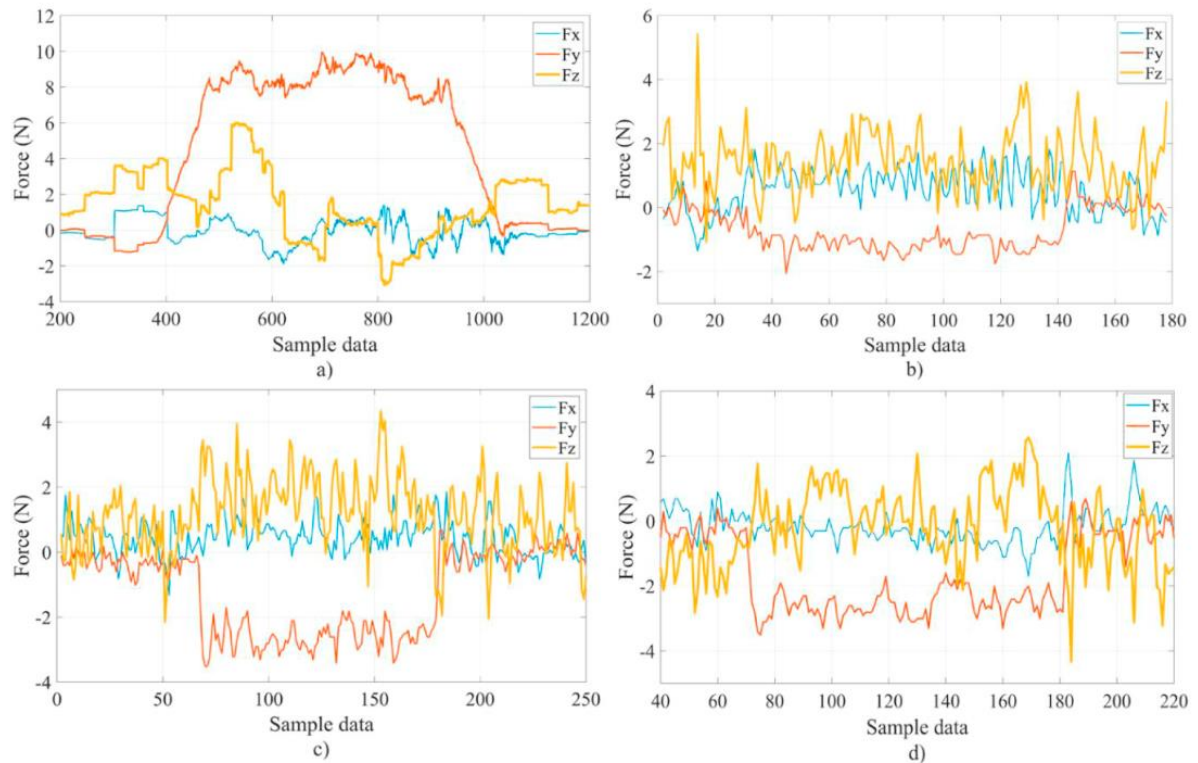


Рисунок 5.3 - Зусилля обробки: а - дослід 1; б - експеримент 4; с - експеримент 6; д - Експеримент 9.

Колаборативний робот UR3 має багато переваг у реалізації керування силою, оскільки його внутрішнє керування дозволяє легко зчитувати змінні позиції та швидкості в суглобах і системі відліку кінцевого ефектора. Ми реалізували внутрішній/зовнішній цикл керування, як у рівнянні, через командний сценарій «speedL». При виконанні випробувань із силовим контролем нестабільність вимірювань суттєво вплинула на контур керування, породжуючи помилки, які не були компенсовані.

Отже, необхідно глибше заглибитися в модель обробки робота, щоб зробити управління більш точним. Перша альтернатива полягає в тому, щоб включити еластичність суглобів у контур керування через правильне визначення матриць жорсткості в суглобі та просторі завдання.

Це передбачає модифікацію динамічної моделі робота, щоб розглядати її як пружну безлінійну модель, за допомогою якої можна було б зменшити

вплив гнучкості. Враховуючи отримані результати, недостатня жорсткість рук спільного робота ускладнює виконання операцій обробки з контрольованими вимогами до розмірів і обробки.

Однак система зменшення, яку колаборативні роботи включають у свої суглоби, дає змогу досягти більшої адаптації порівняно з жорсткими руками робота. У спільній роботі жорсткість може бути визначена індивідуально для кожного з'єднання залежно від конфігурації, прийнятої рукою, і використовуваних умов різання (подача різку, швидкість шпинделя, глибина кроку та перекриття).

Як було підтверджено в попередніх випробуваннях, проведених для оцінки використання колаборативного робота під час виконання операцій обробки, його керування має завершуватися зовнішнім циклом. Він фіксуватиме миттєві зусилля в режимі реального часу, який буде служити для модифікації декартового відхилення за допомогою матриці жорсткості плеча. Таким чином, можна буде динамічно діяти на траєкторії, що виконується для досягнення цілей. Щоб досягти цього, потрібна точна математична модель відповідно до фактичної поведінки кріплення рукоятки (залежно від типу встановлених коробок передач, операції обробки, інструментів тощо), яка дозволяє розширити матрицю жорсткості, перевірену на варіації, в частині від його змінних, виміряних зовнішньо.

6 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ, ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1. Система управління охороною праці

Система управління охороною праці (СУОП) — це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці. Створення СУОП здійснюється шляхом послідовного визначення мети і об'єкта управління, завдань і заходів щодо охорони праці, функцій і методів управління, побудови організаційної структури управління, складання нормативно-методичної документації. Головна мета управління охороною праці є створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Охорона праці базується на законодавчих, директивних та нормативно-технічних документах. При управлінні охороною праці не повинні прийматись рішення та здійснюватись заходи, що суперечать діючому законодавству, державним нормативним актам про охорону праці, стандартам безпеки праці, правилам та нормам охорони праці.

До основних функцій управління охороною праці належать:

- прогнозування і планування робіт, їх фінансування;
- організація та координація робіт;
- облік показників, аналіз та оцінка стану умов і безпеки праці;
- контроль за станом охорони праці та функціонуванням СУОП;
- стимулювання діяльності з охорони праці.

Функція планування, в основі якої лежить прогностичний аналіз, має вирішальне значення в СУОП. Планування роботи з охорони праці поділяється на перспективне, поточне та оперативне.

Перспективне планування охоплює найбільш важливі, трудомісткі й довгострокові за терміном виконання заходи з охорони праці, виконання яких, як правило, вимагає сумісної роботи кількох підрозділів підприємства. Можливість виконання заходів перспективного плану має бути підтверджена обґрунтованим розрахунком необхідного матеріально-технічного забезпечення і фінансових витрат із зазначенням джерел фінансування. Основною формою перспективного планування роботи з охорони праці є розроблення комплексного плану підприємства (на 3—5 років) щодо покращення стану охорони праці.

Поточне планування здійснюється у межах календарного року шляхом розроблення та включення відповідних заходів до розділу "Охорона праці" колективного договору.

Оперативне планування роботи з охорони праці здійснюється за підсумками контролю стану охорони праці у структурних підрозділах і на підприємстві в цілому або перевірок органів державного нагляду. Оперативні заходи щодо усунення виявлених недоліків зазначаються у наказі роботодавця.

Оперативне планування роботи з охорони праці здійснюється за підсумками контролю стану охорони праці в структурних підрозділах і на підприємстві в цілому. Оперативні заходи щодо усунення виявлених недоліків зазначаються безпосередньо у наказі власника підприємства, який видається за підсумками контролю, або у плані заходів, як додатку до наказу.

Функція СУОП щодо організації та координації робіт передбачає формування органів управління охороною праці на всіх рівнях управління і всіх стадіях виробничого процесу, визначення обов'язків, прав, відповідальності та порядку взаємодії осіб, що приймають участь в процесі управління, а також прийняття та реалізацію управлінських рішень.

Контроль за станом охорони праці. Дійове управління охороною праці можна здійснювати тільки при наявності повної, своєчасної і вірогідної

інформації про стан охорони праці. Одержати таку інформацію, виявити можливі відхилення від норм безпеки, а також перевірити виконання планів та управлінських рішень можна тільки на підставі регулярного та об'єктивного контролю.

До основних форм контролю за станом охорони праці належать: оперативний контроль; контроль, що проводиться службою охорони праці підприємства; громадський контроль; адміністративно-громадський трьохступеневий контроль; відомчий контроль вищих органів. Необхідно зазначити, що крім контролю, здійснюється нагляд за охороною праці з боку державних та профспілкових інспекцій.

Адміністрація (роботодавець) для створення безпечних і нешкідливих умов праці працівників і для власної безпеки зобов'язана керуватися переліком таких основних нормативно-законодавчих актів і документів з охорони праці:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Типове положення про службу охорони праці;
- Положення про порядок розслідування нещасних випадків, що сталися під час навчально-виховного процесу в навчальних закладах (Наказ МОН України № 616 від 31.08.2001 року):
 - Порядок розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві (Постанова КМУ № 1112 від 25 серпня 2004 року);
 - Типове положення про навчання з питань охорони праці;
 - Положення про розробку інструкцій з охорони праці;
 - Перелік робіт з підвищеною небезпекою;
 - Граничні норми підняття і переміщення важких речей жінками;
 - Граничні норми підняття і переміщення важких речей неповнолітніми;
- Положення про медичний огляд працівників окремих категорій;

- Перелік посад посадових осіб, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці;
- Порядок розробки і затвердження власником нормативних актів про охорону праці, чинних на підприємстві;
- Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту (Наказ Держгірпромнагляду від 24.03.2008 року № 53);
- Порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці (Постанова Кабінету Міністрів України N 442 від 01.09.1992 року);
- Типове положення про комісію з питань охорони праці;
- Типове положення «Про кабінет охорони праці».

Стимулювання діяльності з охорони праці спрямовано на створення зацікавленості працівників у забезпеченні здорових та безпечних умов праці. Стимулювання передбачає як моральні, та матеріальні заохочення, так і покарання за невиконання покладених на конкретну особу зобов'язань стосовно безпеки праці або порушення вимог щодо охорони праці. До числа останніх належать: премії, винагороди за виконану конкретну роботу, винахідництво та раціоналізаторські пропозиції з питань охорони праці. Джерелом стимулювання діяльності з охорони праці є фонди охорони праці..

6.2. Вимоги до робочого середовища користувача ЕОМ: мікроклімат, освітлення, рівень шуму, електромагнітне випромінювання

Приміщення з ЕОМ повинні бути оснащені системою автоматичної пожежної сигналізації відповідно до вимог переліку однотипних за призначенням об'єктів, які підлягають обладнанню автоматичними установками пожежегасіння та пожежної сигналізації, затвердженого наказом Міністерства внутрішніх справ України і зареєстрованого в

Міністерстві юстиції України з димовими пожежними сповіщувачами та переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку 2 шт. на кожні 20 кв. м площі приміщення з урахуванням граничнодопустимих концентрацій вогнегасної рідини відповідно до вимог Правил пожежної безпеки в Україні .

Правила експлуатації ЕОМ встановлюють вимоги безпеки та санітарно-гігієнічні вимоги до обладнання робочих місць користувачів ЕОМ і працівників, що виконують обслуговування, ремонт та налагодження ЕОМ, та роботи з застосуванням ЕОМ, відповідно до сучасного стану техніки та наукових досліджень у сфері безпечної організації робіт з експлуатації ЕОМ та з урахуванням положень міжнародних нормативно-правових актів з цих питань.

Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого середовища включають вимоги до параметрів мікроклімату, освітлення, рівень шуму і електромагнітного випромінювання.

У виробничих приміщеннях на робочих місцях мають забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості й рухливості повітря.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення. Природне світло повинно проникати через бічні світлопрорізи, зорієнтовані, як правило, на північ чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5%. При виробничій потребі дозволяється експлуатувати ЕОМ у приміщеннях без природного освітлення за узгодженням з органами державного нагляду за охороною праці та органами і установами санітарно-епідеміологічної служби.

Загальне освітлення має бути виконане у вигляді суцільних або переривчатих ліній світильників, що розміщуються збоку від робочих місць (переважно зліва) паралельно лінії зору працівників.

Рівні шуму на робочих місцях осіб, що працюють з відеотерміналами та ЕОМ, визначені ДСанПіН 3.3. 2-007-98.

Для забезпечення нормованих рівнів шуму у виробничих приміщеннях та на робочих місцях застосовуються шумопоглинальні засоби, вибір яких обґрунтовується спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Рівні електромагнітного випромінювання та магнітних полів повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.1. 006 "ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля", СН N 3206-85 "Гранично допустимі рівні магнітних полів частотою 50 Гц" та ДСанПіН 3.3. 2-007-98.

6.3. Створення і функціонування системи моніторингу довкілля з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території

Державна система моніторингу довкілля - це система спостережень, збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки. Це Положення визначає порядок створення та функціонування такої системи в Україні.

Система моніторингу є складовою частиною національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн [46].

Система моніторингу – це відкрита інформаційна система, пріоритетами функціонування якої є захист життєво важливих екологічних інтересів людини і суспільства; збереження природних екосистем; відвернення кризових змін екологічного стану довкілля і запобігання

надзвичайним екологічним ситуаціям. Створення і функціонування системи моніторингу з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території, ґрунтується на принципах:

- узгодженості нормативно-правового та організаційно-медичного забезпечення, сумісності технічного, інформаційного і програмного забезпечення її складових частин;

- систематичності спостережень за станом довкілля та техногенними об'єктами, що впливають на нього;

- своєчасності отримання, комплексності оброблення та використання інформації про стан довкілля, що надходить і зберігається в системі моніторингу;

- об'єктивності первинної, аналітичної і прогностичної інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та оперативності її доведення до органів державної влади, органів місцевого самоврядування, громадських організацій, засобів масової інформації, населення України, заінтересованих міжнародних установ та світового співтовариства.

Моніторинг довкілля здійснюють:

- Мінприроди - ґрунтів на природоохоронних територіях (вміст ЗР, у тому числі радіонуклідів); державного екологічного картування території України для оцінки його стану та його змін під впливом господарської діяльності; наземних екосистем (фонова кількість ЗР, у тому числі радіонуклідів); видів рослинного і тваринного світу, що перебувають під загрозою зникнення, та видів, що перебувають під особливою охороною.

- Мінекономіки - ґрунтів сільськогосподарського використання (радіологічні, агрохімічні та токсикологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів); сільськогосподарських рослин і продуктів з них (токсикологічні та радіологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів).

□ Держлісагентство - ґрунтів земель лісового фонду (радіологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів); лісової рослинності (стан, продуктивність, пошкодження біотичними та абіотичними чинниками, біорізноманіття, радіологічні визначення); мисливської фауни (видові, кількісні та просторові характеристики);

□ Держгеокадастр - ґрунтів і ландшафтів, зрошуваних і осушених земель (вторинне підтоплення і засолення тощо); берегових ліній річок, морів, озер, водосховищ, лиманів, заток, гідротехнічних споруд (динаміка змін, ушкодження земельних ресурсів);

□ Мінрегіон - питної води централізованих систем водопостачання (вміст ЗР, обсяги споживання); стічних вод міської каналізаційної мережі та очисних споруд (вміст ЗР, обсяги надходження);

□ Держгеонадра - підземних вод (ресурси та використання); ендегенних та екзогенних процесів (видові і просторові характеристики, активність прояву).

Фінансування робіт із створення і функціонування системи моніторингу та її складових частин здійснюється відповідно до порядку фінансування природоохоронних заходів за рахунок коштів, передбачених у державному та місцевих бюджетах згідно із законодавством.

Покриття певної частини витрат на створення і функціонування складових частин і компонентів системи моніторингу може здійснюватися за рахунок інноваційних фондів у межах коштів, передбачених на природоохоронні заходи, міжнародних грантів та інших джерел фінансування.

6.4. Організація цивільного захисту на об'єктах промисловості та виконання заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного походження

Виходячи з принципів побудови цивільного захисту в Україні слід підкреслити, що територіально - виробничий принцип знайшов втілення в організації цивільного захисту на об'єктах народного господарства, а також на територіях областей, міст і районів, в тому числі міських та сільських.

Відповідно до статті 16 Кодексу цивільного захисту України та з метою запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру (далі - надзвичайні ситуації), забезпечення стійкого функціонування об'єктів в умовах особливого періоду Кабінет Міністрів України.

Поставляє установити, що дія цієї постанови поширюється на органи управління цивільного захисту, а саме на центральні органи виконавчої влади, Раду міністрів Автономної Республіки Крим, обласні, Київську та Севастопольську міські, районні, районні у м. Києві та Севастополі державні адміністрації, військово-цивільні адміністрації, органи місцевого самоврядування та об'єкти незалежно від форми власності, порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво важливим національним інтересам та які провадять діяльність та надають послуги в галузях енергетики, хімічної промисловості, підлягають охороні та обороні в умовах надзвичайного стану і особливого періоду, є об'єктами підвищеної небезпеки.

Для керівництва поточної роботи з цивільного захисту на об'єкті економіки створюється основний орган управління - штаб цивільного захисту. До складу штабу цивільного захисту входять: начальник штабу і його заступники (помічники) з оперативно-розвідувальної частини, бойової підготовки, житлового сектора.

Посада начальника штабу цивільного захисту передбачається штатним розкладом об'єкта. Начальник штабу є першим заступником начальника цивільного захисту об'єкта і має право за його ім'ям віддавати накази та розпорядження з цивільного захисту. Він є безпосереднім організатором управління цивільним захистом і сповіщення про загрозу або факт надзвичайної ситуації, розвідки, дозиметричного і хімічного контролю, веде поточне та перспективне планування, підготовку формувань і виробничого персоналу з цивільного захисту та контроль за виконанням всіх заходів з цивільного захисту.

Керівникам функціональних та територіальних підсистем єдиної державної системи цивільного захисту та підприємствам, установам, організаціям незалежно від форми власності, на які поширюється дія цієї постанови, забезпечити:

- уточнення планів реагування на надзвичайні ситуації і планів локалізації та ліквідації наслідків аварій, здійснення заходів щодо запобігання їх виникненню;
- готовність до здійснення оповіщення органів управління та сил цивільного захисту, населення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайної ситуації та інформування їх про межі поширення, наслідки, способи та методи захисту, а також дії у зоні можливої надзвичайної ситуації;
- спостереження та контроль за ситуацією на об'єктах, на які поширюється дія цієї постанови, територіях цих об'єктів та/або за їх межами, а також здійснення постійного прогнозування можливості виникнення надзвичайних ситуацій, їх масштабів;
- готовність наявних сил і засобів цивільного захисту, можливість залучення додаткових сил і засобів у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
- створення і використання матеріальних резервів для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій і ліквідації їх наслідків.

Державній службі з надзвичайних ситуацій узагальнювати аналітичні матеріали та подавати їх для розгляду Державній комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій для забезпечення координації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій державного рівня.

Остаточне рішення щодо рівня надзвичайної ситуації з подальшим відображенням її у даних статистики, у тому числі при відсутності достатніх відомостей щодо розвитку надзвичайної ситуації, приймає спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади, до компетенції якого входить вирішення питань захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, за погодженням у разі потреби із зацікавленими міністерствами та іншими центральними органами виконавчої влади. Обов'язково враховується (за його наявності) експертний висновок регіональної комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій щодо рівня надзвичайної ситуації.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування промисловим роботом-маніпулятором для забезпечення фрезерувальної обробки.

Було проаналізовано основні розробки в цій галузі, розглянуто основні моделі при реалізації маніпулятивних систем обробки, вказано сфери їх застосування.

В результаті було промодельовано роботу системи керування таким маніпулятором, що дозволило покращити режими обробки при фрезеруванні.

Впровадження таких систем дозволить розширити сферу застосування промислових роботів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Robotics. W. Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots. World Robotic Report, 2017. p. 15–24.
2. Chen, Y., Dong F. Robot machining: recent development and future research issues. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 66, 2013. p. 1489–1497
3. Iglesias I., Sebastián M., Ares J. E. Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential. *Procedia Engineering*. Vol. 132, 2015. p. 911–917.
4. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier, S, Furet, B., Pashkevich, A. Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 48, 2017. p. 12–29.
5. Pan Z. Chatter analysis of robotic machining process. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 173, 2006. p. 301–309.
6. Hui Zhang, Jianjun Wang, Zhang, G. Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance. In *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE, 2005. p. 1127–1132.
7. Cen L., Melkote. S. N. Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling. *Procedia Manufacturing*. Vol. 10, 2017. p. 486–496.
8. Caro S., Dumas C., Garnier S. Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE., 2013. p. 2921–2926.
9. Pan Z., Zhang H. Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control. *Industrial Robot: An International Journal*. Vol. 35, 2008. p. 400–409.

10. Guo Y., Dong H., Ke Y. Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 35, 2015. p. 69–76.
11. Abele E., Weigold M., Rothenbücher S. Modeling and identification of an industrial robot for machining applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 56, 2007, p. 387–390.
12. Pashkevich A., Klimchik A., Chablat D. Enhanced stiffness modeling of manipulators with passive joints. *Mechanism and Machine Theory*. Vol. 46, 2011. p. 662–679.
13. Chen S. F., Kao, I. Conservative congruence transformation for joint and Cartesian stiffness matrices of robotic hands and fingers. *International Journal of Robotics Research*. Vol. 19, 2000. p. 835–847.
14. Dumas C., Caro S., Garnier S., Furet B. (). Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 27, 2011. p. 881–888.
15. Olofsson B. *Topics in Machining with Industrial Robot Manipulators and Optimal Motion Control*, Department of Automatic Control, Lund University. 2015
16. Tyapin I., Hovland G., Kosonen P., Linna T. Identification of a static tool force model for robotic face milling. In *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. IEEE, 2014. p. 1–6.
17. Lehmann C., Halbauer M., Euhus D., Overbeck D. Milling with industrial robots: Strategies to reduce and compensate process force induced accuracy influences. In *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETF A 2012)*. IEEE, 2012. p. 1–4.
18. Rosa D. G., Feiteira J., Lopes A. M., de Abreu, P. A. F. (). Analysis and implementation of a force control strategy for drilling operations with an industrial

- robot. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Vol. 39, 2017. p. 4749–4756.
19. Zhang H., Pan Z. Robotic machining: material removal rate control with a flexible manipulator. In *2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*. IEEE, 2008. p. 30–35.
 20. Sörnmo O., Olofsson B., Robertsson A., Johansson R. Increasing Time-Efficiency and Accuracy of Robotic Machining Processes Using Model-Based Adaptive Force Control. *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 45, 2012. p. 543–548.
 21. Chen S., Zhang T. Force control approaches research for robotic machining based on particle swarm optimization and adaptive iteration algorithms. *Industrial Robot: An International Journal*. Vol. 45, 2018. p. 141–151.
 22. Marchal P. C., Sörnmo O., Olofsson B., Robertsson A., Ortega J. G., Johansson R. Iterative Learning Control for Machining with Industrial Robots. *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 47, 2014. p. 9327–9333.
 23. Ilyukhin Y. V., Poduraev Y. V., Tatarintseva A. V. Nonlinear Adaptive Correction of Continuous Path Speed of the Tool for High Efficiency Robotic Machining. *Procedia Engineering*. Vol. 100, 2015. p. 994–1002.
 24. Klimchik A., Bondarenko D., Pashkevich A., Briot S., Furet B. (). Compliance error compensation in robotic-based milling. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Cham. Vol. Vol. 283, 2014. p. 197–216.
 25. Garnier S., Subrin K., Waiyagan K. (). Modelling of Robotic Drilling. *Procedia CIRP*. Vol. 58, 2017. p. 416–421.
 26. Brunete A., Gambao E., Koskinen J.(). Hard material small-batch industrial machining robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 7, 2017. p. 59–1.
 27. Huynh H. N., Verlinden O., Riviere-Lorphevre E. Robotic Machining Simulation using a Simplified Multibody Model. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2017. p. 0885–0894.

28. Zivanovic S., Slavkovic N., Milutinovic D. An approach for applying STEP-NC in robot machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 49, 2018. p. 361–373.
29. Mousavi S., Gagnol V., Bouzgarrou B. C., Ray P. Control of a Multi Degrees Functional Redundancies Robotic Cell for Optimization of the Machining Stability. *Procedia CIRP*. Vol. 58, 2017. p. 269–274.
30. Mousavi S., Gagnol V., Bouzgarrou B. C., Ray P. Stability optimization in robotic milling through the control of functional redundancies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 50, 2018. p. 181–192.
31. Zargarbashi S. H. H., Khan W., Angeles J. Posture optimization in robot-assisted machining operations. *Mechanism and Machine Theory*. Vol. 51, 2012. p. 74–86.
32. Lin Y., Zhao H., Ding H. Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 48, 2017. pp. 59–72.
33. Cen L., Melkote S. N. CCT-based mode coupling chatter avoidance in robotic milling. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 29, 2017. p. 50–61.
34. Vieler, H., Karim A., Lechler A. Drive based damping for robots with secondary encoders. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 47, 2017. p. 117–122.
35. Olof S., Schneider U., Robertsson, A., Puzik, A., Johansson, R. High-Accuracy Milling with Industrial Robots using a Piezo-Actuated High-Dynamic Compensation Mechanism. *COMET*. 2013.
36. Mohammad A. E. K., Hong J., Wang D. (). Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect
37. for robotic polishing using macro-mini robot approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 49, 2018. p. 54–65.

38. Möller C., Schmidt H. C., Koch P., Böhlmann C., Kothe S.-M., Wollnack J., Hintze, W. Machining of large scaled CFRP-Parts with mobile CNC-based robotic system in aerospace industry. *Procedia Manufacturing*. Vol. 14, 2017. p. 17–29.
39. Tian F., Lv C., Li Z., Liu G. (). Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 14, 2016. p. 55–64.
40. Barnfather J. D., Abram, T. Efficient compensation of dimensional errors in robotic machining using imperfect point cloud part inspection data. *Measurement*. Vol. 117, 2018. p. 176–185.
41. Denkena B., Bergmann B., Lepper T. (). Design and optimization of a machining robot. *Procedia Manufacturing*. Vol. 14, 2017. p. 89–96.
42. Vosniakos G, Matsas E. Improving feasibility of robotic milling through robot placement optimization. *Robot Comput Integr Manuf* 26, 2010. p. 517–525.
43. Lopes A, Pires EJS. Optimization of the workpiece location in a machining robotic cell. *Int J Adv Robot Syst* 8(6), 2011. p. 37–46.
44. Andrisano A.O., Leali F., Pellicciari M. Integrated design of robotic workcells for high quality machining. *Proc of Inter Conf.on Innovative Methods in Product Design, Italy*, 2011. p 316–321.
45. Bisu C., Cherif M., Gerard A., K'Nevez J. Dynamic behavior analysis for a six axis industrial machining robot, *Proc ICASAAM*, September, 2011.
46. Duma C., Caro S., Garnier S., Furet B. Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots. *Robot Comput Integr Manuf* 27(4), 2011 p. 881–888.
47. Dragomatz D, Mann S () A classified bibliography of literature on NC milling path generation. *Computer-aided design* 29(3), 1997. p. 239–247.
48. Chen H.C., Yau H.T., Lin C.C. Computer-aided process planning for NC tool path generation of complex shoe molds. *Int J AdvManuf Technol* 58, 2012. p. 607–619.

49. Robomaster. www.robotmaster.com. Accessed 26 Jul 201250. Walstra W.H., Bronsvort W.F., Vergeest JSM. Interactivesimulation of robot milling for rapid shape prototyping. *ComputGraph* 18(6), 1994. p. 861–871.
50. Olabi A., Bearee R., Nyiri E., Gibaru O. Enhanced trajectoryplanning for machining with industrial six-axis robots. *IEEEInternational conference on Industrial Technology*, 14–17 March,France, 2010. p. 500–506.
51. Xiao W.L., Strau B. H., Loooh B. T., Hoffmeister H. W. () Closed-form inverse kinematics of 6R milling robot with singularityavoidance. *Prod Eng* 5(1), 2011. p. 103–110.
52. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.
53. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
54. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
55. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
56. Введення в компютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, компютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.

57. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.